

RADAN KUNNOSSAPITOKUSTANNUSTEN

KIRJALLISUUSTUTKIMUS



Mikael Fröberg

RADAN KUNNOSSAPITOKUSTANNUSTEN

KIRJALLISUUSTUTKIMUS

o Mikael Fröberg

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5140
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-050-x
ISSN 1455-2604

Fröberg, Mikael: Radan kunnossapitokustannusten kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2001. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2001. 74 sivua ja 1 liite. ISBN 952-445-050-x, ISSN 1455-2604.

TIIVISTELMÄ

Kilpailu kuljetusalalla lisääntyy jatkuvasti. Rautateillä kuljetuskapasiteetin lisääminen edellyttää akselipainojen korottamista, sillä junien pituutta tai määrää ei jo nykyisinkin vilkkaasti liikennöidyillä radoilla voida juurikaan lisätä.

Akselipainon noston vaikutuksia on Suomessa aiemmin tutkittu varsin vähän. Tästä johtuen kirjallisuustutkimus perustuu lähes kokonaan ulkomaisiin lähteisiin. Lisäksi tutkimusta varten haastateltiin kotimaisia rautatiealan asiantuntijoita. Tutkimukseen sisältyi myös yhteinen seminaari Ruotsin Banverketin kunnossapitoasiantuntijoiden kanssa.

Tutkimuksen tavoitteena oli saada selville kunnossapitokustannusten muutoksen suunta ja suuruusluokka, kun suurinta sallittua akselipainoa korotetaan 225 kN:sta 250 kN:iin ja mahdollisesti edelleen 300 kN:iin. Vertailu pyrittiin suorittamaan niin, että kuljetettu kokonaistonnimäärä pysyy samana akselipainon noustessa. Lisätavoitteena oli myös selvittää se radan tai eri radanosien kulumisaste, jolla kunnossapitotoimenpiteisiin on edullisinta ryhtyä.

Kirjallisuustutkimuksen lähteistä ei löytynyt aineistoa, joka olisi suoraan vastannut tämän tutkimuksen asetelmaa. Aineistoa jouduttiin muokkaamaan laskelmin vastaamaan tutkimuksen tavoitteita. Laskelmat sisältävät joukon oletuksia, joten lopputulokseen sisältyy selvä virhemarginaali.

Sekä kirjallisuustutkimus että haastattelut antoivat samansuuntaiset ja myös saman suuruiset tulokset. Kuitenkin voidaan sanoa, että kiskojen ja vaihteiden osuudet kunnossapitokustannusten muutoksiin ovat merkityksellisimmät lopputuloksen kannalta.

Kunnossapitokustannukset nousevat enintään 10 % akselipainon noston myötä. Sen tarkempaa tulosta ei aineistosta voi päätellä. Tulos voidaan ilmoittaa joko akselia kohden tai alkuasetelman mukaan niin, että kokonaistonnimäärä ei muutu. Kysymykseen, millä radan vaurioasteella kunnossapitoon kannattaa ryhtyä, ei tämän tutkimuksen puitteissa pystytty vastaamaan.

Fröberg, Mikael: Literature study on the track maintenance costs, 250 kN and 300 kN axle loads. Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 2001. Publications of the Finnish Rail Administration A 4/2001. 74 pages and 1 appendix. ISBN 952-445-050-x, ISSN 1455-2604.

SUMMARY

Competition in the transporting business increases all the time. Railway tracks are already so frequented, that the way to raise the transporting capacity is to increase the axle load. It is not possible to increase the length or the number of the trains much more.

The influences of higher axle loads have been studied very little in Finland previously. Due to this, the literary study is mostly based on foreign sources. Furthermore, domestic railway experts were interviewed for the study. The study also included a seminar with experts from the Swedish National Railway Administration Banverket.

The aim of the study was to find out in which direction and how much the maintenance costs will change, when the highest allowed axle load increases from 225 kN to 250 kN, and possibly even further to 300 kN. The comparison was made assuming that the transported tonnes as a whole will not change even though the axle load increases. Another aim was to determine the degree of damage on the track or different parts of the track, when it would be most economical to begin maintenance operations.

The literary sources did not contain material that directly would correspond to the starting point this study was based on. The material had to be worked over by recalculation according to the aims of this study. The calculations contain many assumptions, and therefore the final result has a considerable error margin.

The results of both the literary study and the interviews were similar both for the direction of the change as well as the size of it. The rails and the switches have the biggest influence on the change of the maintenance costs.

The maintenance costs will increase with no more than 10 % when the axle load rises. That is the accuracy that can be reached in this study. The final result can be given either per axle or, in accordance with the starting point, so that the transported tonnes as a whole will not change. The question about the most economical time to start maintenance operations could not be answered in this study.

ESIPUHE

Ratahallintokeskus aloitti vuonna 1998 tutkimusprojektin, jonka tarkoituksena oli tuottaa tietoa 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoa varten. Tämä radan kunnossapitokustannusten kirjallisuusselvitys on osa tutkimusprojektia.

Tämä tutkimus pohjautuu diplomityöhön, jonka on tehnyt tekniikan ylioppilas Mikael Fröberg Teknillisen korkeakoulun (TKK) Rakennus- ja ympäristötekniikan osastolla. Työtä on ohjannut ohjausryhmä, jonka jäseninä ovat olleet Markku Nummelin, Pasi Leimi ja Kari Ojanperä Ratahallintokeskuksen teknisestä yksiköstä sekä professori Olli-Pekka Hartikainen TKK:sta.

Helsingissä huhtikuussa 2001

Ratahallintokeskus
Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SUMMARY	4
ESIPUHE	5
SISÄLLYSLUETTELO	6
1. JOHDANTO.....	8
2. TUKIKERROS.....	10
2.1 Tukikerroksen mitoitus	10
2.2 Tukikerroksen tehtävät.....	11
2.3 Raidesepeliltä vaadittavia ominaisuuksia.....	11
2.4 Raidesepelin jauhautumista pienentäviä toimenpiteitä.....	11
2.5 Raidesepelin nykyiset laatuvaatimukset	12
2.6 Sepelitutkimus	12
2.7 Siltatutkimus.....	14
2.8 Kenttäkokeita.....	16
2.8.1 Ruotsalainen tutkimus	16
2.8.2 Amerikkalainen tutkimus	18
2.9 Päätelmiä.....	19
2.10 Raidesepelin elinkaarikustannukset	20
3. PÖLKYT JA KIINNITYKSET	22
3.1 Yleistä	22
3.2 Ratapölkkyjen valinta	22
3.3 Puuratapölkkyt.....	22
3.3.1 Yleistä.....	22
3.3.2 Mitoitus	22
3.3.3 Kestävyys.....	23
3.4 Betoniratapölkkyt	24
3.4.1 Yleistä.....	24
3.4.2 Mitoitus	24
3.4.3 Kestävyyslaskelma.....	26
4. KISKOT JA LIITOKSET	27
4.1 Raidetyypit	27
4.1.1 Jatkuvakiskoraide.....	27
4.1.2 Pitkäkiskoraide.....	27
4.1.3 Lyhytkiskoraide	27
4.2 Kiskojen ominaisuudet.....	27
4.2.1 Kiskopainot.....	27
4.2.2 Kiskoteräksen kovuusluokat.....	28
4.3 Kiskonhionta.....	30
4.3.1 Ekskursio	30
4.3.2 Ulkomaiset kokemukset	33
4.4 Kiskohitsit	34
4.5 Kiskon kuluminen.....	35

4.6 Kunnossapitokustannusten jakaantuminen.....	35
5. VAIHTEET	36
5.1 Vaihteiden rakenne	36
5.2 Vaihteiden mitoitusperusteet.....	37
5.3 Vaihteiden vauriot	38
5.3.1 Vaurioiden synty.....	38
5.3.2 Vaurioiden jakaantuminen.....	38
6. KAARTEET	40
6.1 Kaarresäteet	40
6.2 Kaarresäteen vaikutus raiteen kulumiseen	40
6.3 Kiskojen kulumisen vähentäminen kaarteissa	42
7. TARKASTUKSET	44
7.1 Pää- ja sivuraiteiden tarkastukset.....	44
7.2 Kunnossapitotasot.....	45
7.2.1 Kunnossapitotaso 1AA.....	45
7.2.2 Kunnossapitotaso 1A.....	45
7.2.3 Kunnossapitotaso 1	46
7.2.4 Kunnossapitotaso 2	46
7.2.5 Kunnossapitotaso 3	46
7.2.6 Kunnossapitotaso 4	47
7.2.7 Kunnossapitotaso 5	47
7.2.8 Kunnossapitotaso 6	47
7.3 Radan tarkastusmenetelmät.....	48
7.3.1 Yleistä.....	48
7.3.2 Tarkastettavat suureet.....	48
7.4 Päätelmiä.....	49
7.4.1 Yleistä.....	49
7.4.2 Ehdotuksia	50
8. LASKELMAT	51
8.1 Oy VR-Rata Ab:n kunnossapitokustannukset	51
8.2 Eurooppalainen tutkimus	53
8.3 Ruotsalaiset tutkimukset	56
8.4 Amerikkalaiset tutkimukset.....	62
8.4.1 Malmbanan	62
8.4.2 Borlänge – Göteborg.....	63
9. PÄÄTELMÄT	68
LÄHDELUETTELO	73

LIITTEET Liite 1 : Haastattelukysymykset

1. JOHDANTO

Kilpailutilanne kaikilla aloilla kiristyy jatkuvasti. Myös kuljetusalalla tämä näkyy selvästi, kun huomattavasti kohonneet polttoainehinnat ovat aiheuttaneet suuria korotuspaineita kuljetusmaksuihin. Tiekuljetukset kilpailevat rautatiekuljetusten kanssa osasta kuljetuksia ja tiekuljetusten kustannuksiin polttoainehinnoilla on ratkaiseva vaikutus. Rautateiden kuljetuskustannusten muodostuminen noudattaa hieman erilaista kaavaa.

Junan kokoaminen ja lastaaminen on huomattavasti vaikeampaa ja vie enemmän aikaa kuin rekka-auton lastaaminen. Rautateiden kuljetuskustannuksista puhuttaessa pidetään nyrkkisääntönä sitä, että junan muodostaminen on kallista mutta vetäminen halpaa. Tämä johtuu siitä, että junanmuodostus vaatii suuren infrastruktuurin ratapihoineen, useine raiteineen ja vaihteineen sekä useamman henkilön työpanoksen. Kun juna sitten on muodostettu ja saatu liikkeelle, sen vetäminen on taloudellista kuljetettuun tavaramäärään nähden.

Jotta rautatiekuljetuksien kilpailukykyä saataisiin parannettua, tulisi ensisijaisesti pyrkiä pienentämään junanmuodostuskustannuksia. Tämä tarkoittaa käytännössä pienempää määrää junia. Junien pituutta ei kannata kasvattaa, koska se vastaavasti nostaisi junanmuodostuskustannuksia. Parempi ratkaisu on kuljettaa sama määrä tavaraa vähemmällä vaunumäärällä. Tämä voidaan tehdä joko suurentamalla vaunuja tai nostamalla akselipainoja. Muualla maailmassa ajetaan paikoitellen selvästi suuremmilla akselipainoilla kuin Suomessa, esimerkiksi Yhdysvalloissa on jo 1950-luvulta saakka ajettu yleisesti 30 US-tonnin (noin 270 kN) akselipainoilla ja tätä ollaan nostamassa 33 US-tonniin (noin 300 kN) tai jopa 36 US-tonniin (noin 320 kN). Myös Ruotsissa on ajettu koeluontoisesti suuremmilla akselipainoilla kuin Suomessa, eli 250 kN ja 300 kN, ja siellä suurin akselipaino 300 kN otettiin käyttöön Gällivare – Luulaja -reitillä 7.3.2001. Suurin sallittu akselipaino Suomessa on tällä hetkellä 225 kN ja sitä ollaan nostamassa 250 kN:iin ja myöhemmin mahdollisesti 300 kN:iin. Erikoisluvalla venäläisen standardin mukaiselle kalustolle on joillakin rataosilla sallittu 245 kN:n akselipainon käyttö nopeudella 60 km/h. Jos akselipainoa nostetaan ja junakoko pidetään ennallaan, merkitsee se rautateiden kuljetuskapasiteetin paranemista.

Akselipainon nostaminen aiheuttaa jonkinlaisen muutoksen radan ja rakenteiden kulumiseen. Tässä tutkimuksessa on tarkoitus selvittää näiden muutosten suuruus ja tarkemmin se, miten muutokset vaikuttavat radan kunnossapitokustannuksiin. Suuremmat painot voivat vaurioittaa kiskoja, vaihteita ja rakenteita entistä enemmän. Toisaalta vähempi määrä akseleita ja junia myös vähentänee kulumista ja vaurioita. Tärkeätä on erottaa toisistaan suurten akselipainojen aiheuttamat vauriot ja pelkästään suuresta liikennemäärästä johtuvat vauriot.

Tehokkain tapa hyödyntää rautatieliikennettä olisi erotella tavaraj- ja henkilöliikenne omille raiteilleen. Kun kaikkien junien nopeus olisi sama, mahdollistaisi se suurimman mahdollisen liikennemäärän lisäyksen. Kun nopeilla ja hitailla junilla on eri vaatimukset radan suhteen, sekaliikenneraide on aina kompromissi eri tarpeiden välillä. Jos päädyttäisiin malliin, jossa eri raiteilla olisi vain yhdenlaista liikennettä, sen toteuttaminen vaatisi lukuisten uusien raiteiden rakentamista. Korkeat kustannukset mahdollistavat tämän vaihtoehdon toteuttamisen ainoastaan rataverkon tärkeimmissä osissa. Siksi

jo olemassa olevilla raiteilla tulee myös tulevaisuudessa olemaan sekä tavara- että henkilöliikennettä./11/

Nykyinen käytössä oleva suurin sallittu akselipaino on 225 kN ja tutkimuksen tavoitteeksi asetettu uusi korkeampi akselipaino on 250 kN. Tutkimus on osa Ratahallintokeskuksen 250 kN ja 300 kN käyttöönottoon liittyvää projektia. Tämä tutkimus on rajattu koskemaan tukikerrosta, ratapölkkyjä, kiskoja kiinnityksineen sekä vaihteita. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään, miten korkeammat akselipainot vaikuttavat radan rakenteisiin ja niiden kunnossapitotarpeisiin sekä kunnossapitokustannuksiin

2. TUKIKERROS

2.1 Tukikerroksen mitoitus

Tukikerros pitää raiteen geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa, jakaa kuormia alusrakenteelle ja muodostaa raiteelle tasaisen ja kantavan alustan. Tukikerroksen materiaalina käytetään raidesepeliä, vähäliikenteisillä radoilla myös raidesoraa. Tukikerroksen mitat määräytyvät sallitun nopeuden, kiskonpituuden sekä tukikerrosmateriaalin ja ratapölkkytyypin perusteella. Tukikerroksen mitoitusperusteet on esitetty taulukossa 2.1./26/

Taulukko 2.1 Tukikerroksen mitoitusperusteet. /26/

Raiteen ja tukikerroksen tyyppi			Tukikerroksen paksuus	Tukikerroksen leveys pölkyn päiden ulkopuolella
Jk-raide ja raidesepeli	$V \leq 160$ km/h	Linja	450 mm (puuratapölkyt)	400 mm (palle, ei kuitenkaan raiteiden välissä tai kun raide rajoittuu kiinteään esteeseen tai kun $V \leq 120$ km/h)
			550 mm (betoniratapölkyt)	
		vaihde	550 mm	400 mm (ei palletta)
	$V > 160$ km/h	linja	550 mm (betoniratapölkyt)	500 mm (palle, ei kuitenkaan raiteiden välissä tai kun raide rajoittuu kiinteään esteeseen)
		vaihde	550 mm	500 mm (ei palletta)
Pk-raide ja raidesepeli	linja		350 mm ¹⁾ (puuratapölkyt)	300 mm ¹⁾ (ei palletta)
			450 mm (puuratapölkyt)	400 mm (ei palletta)
			550 mm (betoniratapölkyt)	
	vaihde		550 mm	400 mm (ei palletta)
Lk-raide ja raidesepeli	linja		350 mm ¹⁾ (puuratapölkyt)	300 mm (ei palletta)
			450 mm (puuratapölkyt)	
			550 mm (betoniratapölkyt)	
	vaihde		550 mm	300 mm (ei palletta)
Lk-raide ja raidesora	linja		450 mm	600 mm (ei palletta)
	vaihde		550 mm	600 mm (ei palletta)

1) Vajaa tukikerros. Päälysrakenne vastaa ominaisuuksiltaan soratukikerroksellista Lk-raidetta. Suurin sallittu nopeus on $V \leq 110$ km/h.

2.2 Tukikerroksen tehtävät

Tukikerroksen tehtävät:

- Kestää ratapölkyn välittämä kuorma
- Tukea raidetta pysty- ja sivusuunnassa raidegeometrian säilyttämiseksi
- Pienentää ratapölkyn välittämät jännitykset alemman rakennekerroksen sallimalle tasolle
- Sita liikenteessä syntyvää dynaamista energiaa ja vaimentaa siten tärinää
- Omata riittävästi tyhjätillaa, jotta tukikerroksen jauhautumisesta syntyvä hienoaines voi valua ja varastoitua tukikerroksen pohjalle
- Mahdollistaa veden poispääsyn tukikerroksesta
- Olla helposti tuettavissa, jolloin virheet raiteen geometriassa voidaan korjata/19/

2.3 Raidesepeliltä vaadittavia ominaisuuksia

Hyvältä raidesepeliltä vaadittavia ominaisuuksia:

- Hyvä iskevän kulutuksen sieto, sitkeys
- Hyvä hiovan kulutuksen kesto, kovuus
- Kuutiomainen, terävasärmäinen raemuoto
- Suuri sepelirakeiden välinen kitka
- Mahdollisimman pieni kemiallinen ja mekaaninen rapautumisalttius
- Mahdollisimman vähäinen hienoainespitoisuus
- Kiviaineksesta syntyvän hienoaineksen hyvä vedenläpäisevyys ja huono vedensitomiskyky
- Tukikerrokseen sopiva raekokojakauma/19/

Oleellista on, että tukikerros ei kerää vettä. Tämä onnistuu, kun tukikerroksen hienoaineksen määrä on vähäinen. Hienoainesta syntyy tukikerroksen jauhautumisesta ja liikkuvasta kalustosta putoavista partikkeleista.

2.4 Raidesepelin jauhautumista pienentäviä toimenpiteitä

Raidesepelin jauhautumista pienentäviä toimenpiteitä:

- Minimoidaan tukikerrokseen kohdistuva iskevä rasitus, jota syntyy kiskoatkoksissa, huonoissa hitsausliitoksissa, epätasaisella raiteella, vioittuneen raiteen kohdissa sekä kuluneista pyöristä
- Minimoidaan tukeminen
- Minimoidaan rataa asennusvaiheessa tulevan sepelin sisältämän hienoaineksen määrä ja varmistetaan, että rakeisuusjakauma tarjoaa riittävän huokostilan
- Käytetään puuratapölkkyjä tai muita pehmeäpohjaisia pölkkyjä
- Käytetään jäykkää kiskoa
- Käytetään kovaa ja sitkeää kiviainesta, joka ei ole altista rapautumiselle
- Käytetään muodoltaan kuutiomaista kiviainesta

- Minimoidaan tukikerrokseen ylhäältäpäin, pääasiassa avovaunuista kulkeutuva hienoaines
- Varmistetaan riittävällä kerrospaksuudella ja välikerroksen rakeisuudella, ettei alusrakenne pääse tunkeutumaan tukikerrokseen
- Minimoidaan ratapenkereen ja pohjamaan painuminen ja siten syntyvä tukemistarve
- Varmistetaan tukikerroksen hyvä kuivatus /19/

2.5 Raidesepelin nykyiset laatuvaatimukset

Suomen rataverkolla nykyään käytetyn raidesepelin rakeisuusalue on 32 – 64 mm. Vuoteen 1995 saakka rakeisuusalueen ohjearvo oli 25 – 55 mm, eli valtaosa rataverkon raidesepelistä on rataan asennettaessa ollut tätä raekokoa. /22/

Tukikerrokseen tulevan raidesepelin ominaisuudet tulee tutkia seuraavilla tutkimusmenetelmillä, taulukko 2.2. /22/

Taulukko 2.2 Raidesepelin tutkimusmenetelmät. /22/

Tutkittava ominaisuus	Tutkimusmenetelmä
Iskunkesto	Haurausarvokoe
Hioutuvuudenkesto	Kuulamylykoe
Mineralogia	Ohuthieanalyysi
Ennakoiva rapautumisalttius	Ohuthieanalyysi/Veden absorptiokoe
Raemuoto	Muotoarvomittaus
Raekokojakauma, hienoainespitoisuus	Seulonta

Käytössä oleva raidesepelin lujuusluokitus on neliportainen. Lujuusluokan määrittämisessä merkitsevät koemenetelmät ovat haurausarvokoe ja kuulamylykoe, taulukko 2.3. Lujuusluokista R1 on paras ja R4 huonoin. Kiviaineksen tulee täyttää molemmat taulukossa esitetyt vaatimukset. Tutkittavan aineksen raemuoto vaikuttaa koetulokseen. Jos koelajitteet ovat hyvin kuutiomaisia, taulukossa esitettyjen luokkien raja-arvot ovat pienemmät. /22/

Taulukko 2.3 Suomalainen raidesepelin lujuusluokitus. /22/

Raidesepelin lujuusluokka	Haurausarvo	Kuulamylyarvo
R 1	< 10	< 8
R 2	< 12	< 10
R 3	< 15	< 12
R 4	< 18	< 14

2.6 Sepelitutkimus

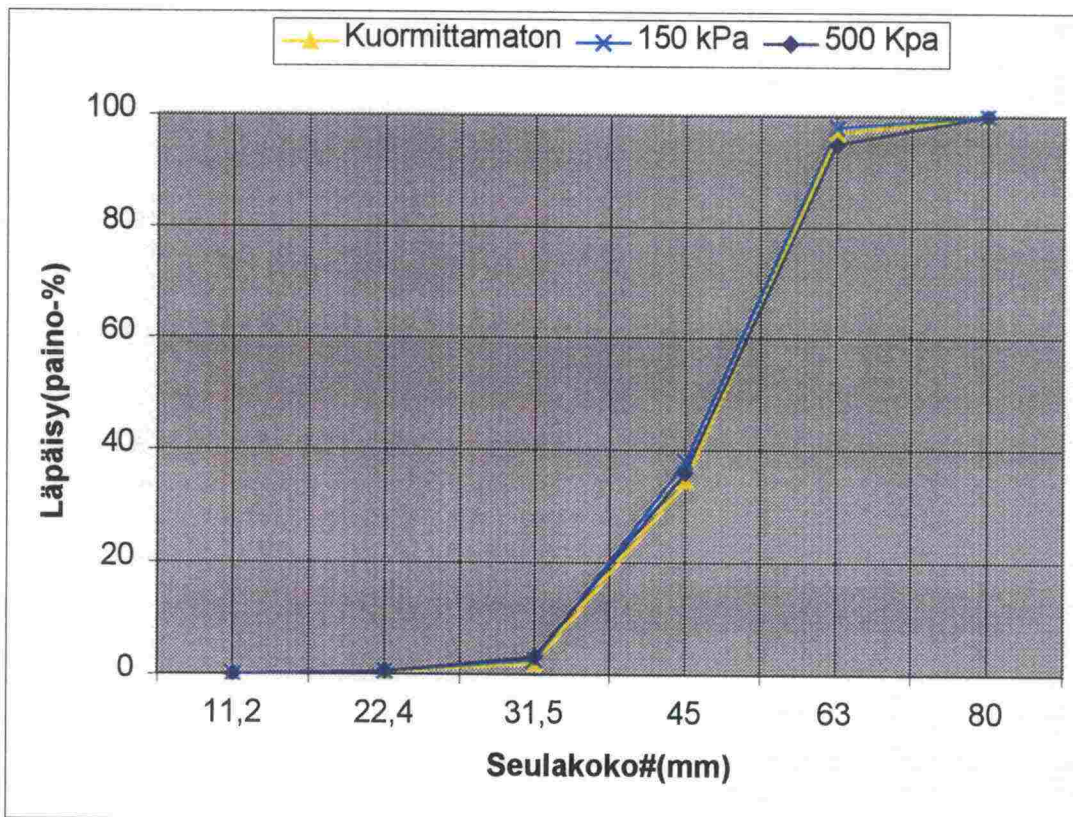
Ruotsissa Banverketin toimeksiannosta tutkittiin ”30 ton på Malmbanan”-projektissa tukikerroksen murtumista eli raidesepelin jauhautumista ”Geotekniikka”-osaprojektissa.

Koe suoritettiin laboratoriossa ja tarkoituksena oli selvittää, miten akselipainon nosto 250 kN:sta 300 kN:iin vaikuttaa tukikerrokseen./1/

Banverketilla on Tomtebodassa varusteet, joita normaalisti käytetään routasuojien, kevyttäytteidien, pölkkyjen ja hitsien koestamiseen. Tämä kyseinen laite sopii myös tukikerroksen tutkimiseen materiaalia kuormittamalla. Laitteessa on suorakulmainen laatikko (pituus 600 mm, leveys 400 mm ja korkeus 200 mm), levy (pituus 600 mm, leveys 400 mm) kuormituksen jakamiseksi ja hydraulisyylinteri dynaamisen kuormituksen aikaansaamiseksi. Dynaamista kuormitusta kuvaamassa oli tässä tapauksessa trapetsimuotoinen neliöaalto jonka taajuus oli 4 Hz. Tukikerrosmateriaali jaettiin neljään osaan, joista yksi seulottiin ja säilöttiin kuormittamattomana vertailunäytteenä. Muita osia ei seulottu ennen kuormittamista./1/

Sepelituloksesta kuormitettiin dynaamisella kuormalla 2 miljoonaa kertaa. Alkuperäinen suunnitelma oli tehdä kolme osakoetta, kuormituksina 150, 500 sekä 300 kPa. Kahden ensimmäisen kokeen jälkeen todettiin erojen jauhautumisessa olevan niin pieniä, että viimeinen 300 kPa:n koe jätettiin kokonaan tekemättä. Raekokajakautuma on esitetty kuvassa 2.1. Suurin ero 150 kPa:n ja 500 kPa:n rakeisuuskäyrissä löytyy 31,5 mm:n seulan kohdalta (2,6 vs. 3,2 paino-%)/1/

Tuloksesta voi päätellä että ko. materiaalilla on riittävä lujuus kestääkseen näitä kuormituksia. Jos kuormituskertoja lisättäisiin, tulosten välinen erotus voisi mahdollisesti lisääntyäkin./1/



Kuva 2.1 Laboratoriokokeiden seulontatulokset. /1/

2.7 Siltatutkimus

Ruotsin Banverketin tutkimuksissa ”30 ton på Malmbanan, Infrastruktur Bro” -osa-projektissa tutkimus tehtiin yhteistyössä Luulajan Teknillisen Korkeakoulun kanssa. Koetta varten tilattiin 20 m³ raidesepeliä, joka kuljetettiin Luulajaan ja laitettiin kasalle. /1/

Vanha ja loppuunpalvellut rautatiesilta tuotiin sisään koehalliin ja tuettiin pystysuoraan asentoon, eli juuri niin kuin se oli ollut radallakin ennen käytöstä poistoa. Sillan betoni-kaukaloon rakennettiin raide kiskoista, betonipölkyistä ja tukikerroksena oli hyvä-laatuista raidesepeliä n. 350 mm pölkyä alapuolella. Itse kokeessa tutkittiin raidesepeliä yhden kuormitetun ratapölkyä alla. /1/

Raiteen rakentamisen ohessa otettiin kolme näytettä sepelin laadun määrittämiseksi. Materiaali tutkittiin Luulajan Teknillisen Korkeakoulun tielaboratoriossa. Tulokset ovat taulukossa 2.4. /1/

Taulukko 2.4 Materiaalien ominaisuudet laboratorikokeissa./1/

Tutkittava ominaisuus	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Keskiarvo
Kuulamylyarvo	13,9	15,7	16,5	15,3
Los Angeles-luku	13,1	13,1	11,1	12,4
Liuskeisuus	1,39	1,40	1,43	1,41
Haurausarvo	42,6	45,1	50,1	45,9

Erot kokeiden välillä olivat suuret, mikä viittaa huonoon menetelmään näytteenotossa. Varsinkin toisessa näytteessä oli suuri määrä hienoaainesta. Näytteet otettiin traktorin kauhasta samalla, kun sepeliä laitettiin paikalleen siltakaukaloon. Näytteet otettiin, kun noin 30%, 50% ja 80% sepelistä oli laitettu paikoilleen. Kolme näytettä painoivat yhteensä noin 190 kg. /1/

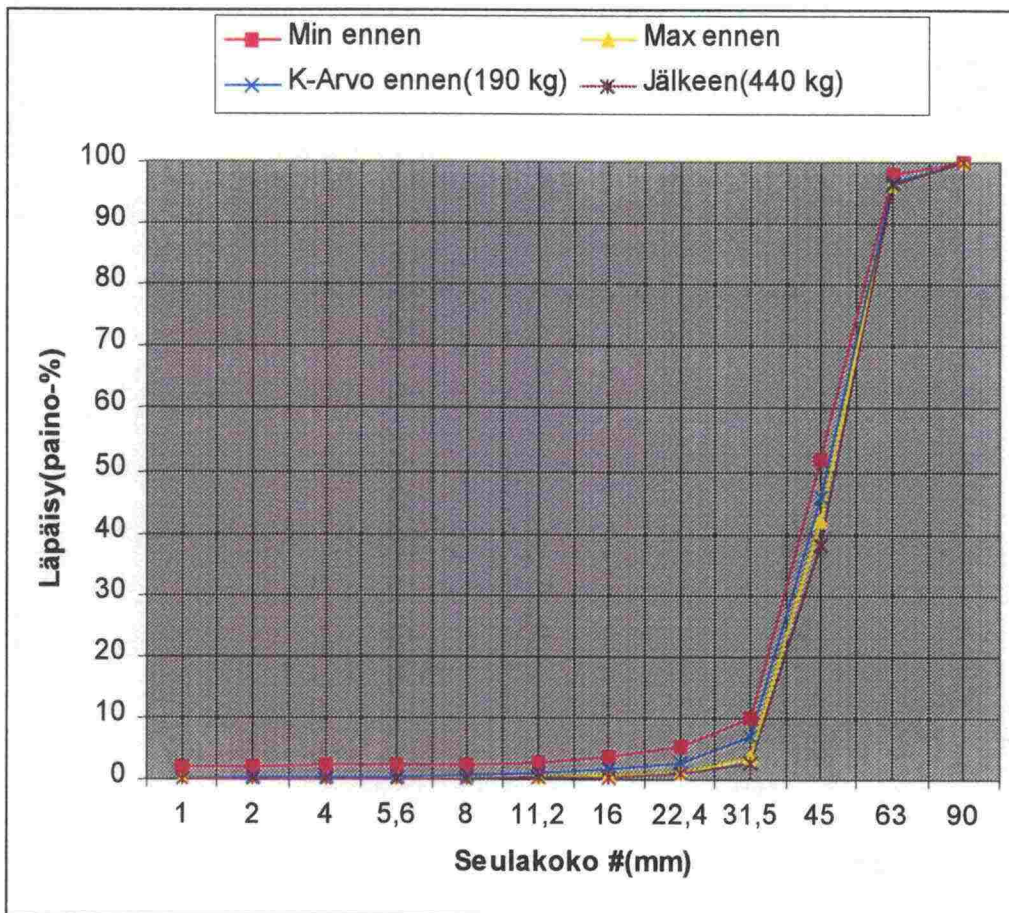
Tutkittava raidesepeli asetettiin tekstiililaatikkoon, jonka mitat olivat 0,65*1,25*0,35m. Raidetta rakennettaessa tekstiililaatikko laitettiin siltakaukalon pohjalle ja sitä täytettiin samaan tahtiin kuin ympäröivää sepelikerrostakin tehtiin. Tekstiililaatikko sijoitettiin kolmannen ratapölkyä alle katsottuna sillan toisesta päästä, ja se oli vain yhden kiskon alla. Raidesepeli tiivistettiin täryttämällä ennen pölkyä ja kiskoja asennusta. /1/

Koko siltaa kuormitettiin dynaamisella kuormalla 6 miljoonaa kertaa. Itse kuorma vastasi 300 kN:n akselipainoa mukaan lukien dynaamiset lisät. Koe käsitti kolme vaihetta: staattinen esikuormitus, dynaaminen väsytytkuormitus sekä staattinen murto-kuormitus. Sepelitutkimus käsitti kaksi ensimmäistä kuormitusvaihetta, viimeinen liittyi sillan kestävytyteen. /1/

Dynaamisen rasituksen jälkeen kiskot irrotettiin ja tekstiililaatikon päällä ollut pölky nostettiin pois paikaltaan. Laatikossa ollut sepeli lapioitiin muoviasioihin, kunnes laatikko voitiin nostaa siinä jäljellä olevan sepelin kanssa. Sepeli kuljetettiin tielaborato-

rioon ja kuoppa siltakaukalossa täytettiin uudella sepelillä, pölkky ja kiskot asennettiin takaisin viimeistä kuormitusta varten. /1/

Tekstiililaatikossa oli materiaalia kaikkiaan noin 440 kg. Se seulottiin samoilla seuloilla, joita oli käytetty laaduntarkkailussa. Seulonnassa havaittiin alkavaa halkeamanmuodostusta, lähinnä pitkulaisissa kivissä lähellä alempaa luokkarajaa (31,5 mm). Rakeisuuskäyriä verrattaessa voitiin todeta, että tutkittava materiaali sisälsi vähemmän hienoaainesta kuormituksen jälkeen kuin ennen kuormitusta, kuva 2.2. /1/



Kuva 2.2 Raekokojakautuma ennen Dynaamista kuormitusta sekä sen jälkeen./1/

Tätä tulosta voidaan selittää sillä, että kyseessä ei ollut sama materiaali, joka seulottiin ennen koetta ja kokeen jälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että laaduntarkkailun näytteenottomenetelmä ei ollut luotettava. /1/

Banverketin raidesepelivaatimukset luokassa 1 (ruotsalainen luokitus) ovat <0,5 paino-% 11,2 mm seulalle ja <4,0 paino-% 31,5 mm seulalle. Kaikissa kolmessa näytteessä raja ylitettiin 11,2 mm seulalla, kuva 2.2. Toisella kontrolliseulalla, eli 31,5 mm, yksi näyte kolmesta oli sallitun rajan sisäpuolella. Materiaalilla oli siis liian suuri hienoaainespitoisuus, seikka joka helposti voi johtaa separoitumiseen. Tässä tapauksessa lienee käynyt juuri niin, kun huomioi näytteiden väliset suuret erot. /1/

Kaikkea tekstiililaatikon sepeliä ei ollut seulottu ennen kuormitusta, mikä tarkoittaa sitä, että raekokojakautuma oli tuntematon. Koska kokeessa syntyi vähän hienoaainesta ja pitkulaisissa kivissä oli pientä halkeamanmuodostusta, pääteltiin, että sepeli joutui tässä kokeessa alttiiksi lähinnä iskuvoimalle eikä niinkään kulutukselle. /1/

Tekstiililaatikossa olleen materiaalin alkuperäisestä raekokojakautumasta huolimatta voidaan todeta, että dynaamisessa kuormituksessa tapahtunut jauhautuminen oli vähäistä. Kyseessä ollut raidesepeli kesti siis 300 kN:n akselipainon, mikä johtuu joko riittävästä kestävyydestä tai siitä että materiaaliin kohdistunut rasitus ei ollut riittävän suuri. Silta säilyi täysin vahingoittumattomana tässä kokeessa. Tulos osoittaa myös oikean näytteenottomenetelmän merkityksen karkeiden lajitteiden osalta. Tässä tapauksessa kaikki laatikossa ollut sepeli olisi pitänyt seuloa ennen koetta. /1/

Kokeessa ollut sepeli oli suomalaisiin raidesepelin luokituksiin nähden varsin hyvälaatuista. Los Angeles -luku on vertailukelpoinen, koska ko. koemenetelmä on yhtenevä kaikkialla. Los Angeles -luvun perusteella tutkittu sepeli olisi suomalaiselta luokituksestaan R2 tai R3 edustaen hyvin keskimääräistä suomalaista radassa käytettyä sepeliä. Tämä materiaali kesti 300 kN:n akselipainon ilman ongelmia. (Lähde: TTKK Rakennusgeologian laboratorio, Pirjo Kuula-Väisänen. Tampere 2000. Haurausarvotestin ja LA-testin vertailu. Julkaisematon).

2.8 Kenttäkokeita

2.8.1 Ruotsalainen tutkimus

Banverket teki myös kenttäkokeita selvittääkseen, millaisia muodonmuutoksia raidesepeliin syntyy 250 kN:n sekä 300 kN:n akselipainoilla itse Malmiradalla (Malmbanan). Mittaukset tehtiin kolmessa kohdassa samalla radalla, paikat valittiin perustamisolosuhteiltaan erilaisiksi, taulukko 2.5. /1/

Taulukko 2.5 Mittausosuudet Malmiradalla./1/

Rataosuus	Pohjamaan tyyppi
1280 + 360	Turve
1316 + 380	Korkea pengerturpeen päällä
1429 + 450	Leikkaus (tiivis moreeni)

Mittaukset osuudella 1429+450 tehtiin pelkästään sen selvittämiseksi, miten kuormitus vaikuttaa tukikerokseen. Mittaukset tällä osuudella tehtiin kolmena eri ajankohtana, taulukko 2.6./1/

Taulukko 2.6 Kenttämittaukset km 1429+450./1/

Mittausajankohta	Olosuhteet/Mittauksen laji
Joulukuu 1995	Koemittaus, osittain jäätynyt maaperä
Maaliskuu 1996	Jäätynyt maaperä
Elokuu 1996	Kuiva ”kesäraide”, testijuna

Muodonmuutokset mitattiin raiteen keskilinjalta kahdelta eri syvyydeltä. Syvyydet olivat noin 1,5 m ja 2,6 m ratapölkyn alapinnasta. Mittarit (ASAT) ovat samaa tyyppiä, joita käytettiin myös kahdella muulla koeosuudella. Suhteellinen paino mitattiin lankavenymäantureilla oikeasta ja vasemmasta kiskosta. Tulos tallennettiin suoraan tietokoneelle.

Rataosuudella 1429+450 etäisyys ”kovaan pohjaan” on kiskon alapinnasta mitattuna vain noin 2,5 m, mistä johtuen pohjamaa on suhteellisen kiinteä. Kahdella muulla koeosuudella pohjamaa on selvästi pehmeämpää; 1280+360 on turpeen päällä ja 1316+380 on 5 m korkealla penkereellä, joka vuorostaan on turpeen päällä. Näillä kahdella osuudella muodonmuutos on ollut suurempi kuin osuudella 1429+450. /1/

Mittaukset joulukuussa ja maaliskuussa antoivat hyvin pieniä muodonmuutoksia, taulukko 2.7. Lukemat ovat niin pienet, että ne ovat aivan mittaustarkkuuden rajoilla. Maaperän ollessa sula mitattiin huomattavasti suurempia muodonmuutoksia (elokuu 1996). /1/

Taulukko 2.7 Kuormatun malmijunan ylityksen aiheuttama muodonmuutos km 1429+450. /1/

Mittausajankohta	Raiteessa	0,6 m kiskon alapinnasta(mm)	1,5 m kiskon alapinnasta(mm)
Joulukuu 1995	-	0,2	0,1
Maaliskuu 1996	2,0 *)	0,15	0,05
Elokuu 1996	2,6 **)	0,5	0,2

*) Mitattu junan seistessä paikallaan

**) Koejuna, akselipaino 250 kN

Mittausteknisistä syistä tulokset on rekisteröity syvyydeltä 0,6 m kiskon alapinnasta alas 1,5 m sekä 2,6m syvyyteen (”kova pohja”). Vastaavat muodonmuutokset osuudella 1280+360 (penger turpeen päällä) taulukossa 2.8. /1/

Taulukko 2.8 Kuormatun malmijunan ylityksen aiheuttama muodonmuutos km 1280+360. /1/

Mittausajankohta	Raiteessa	0,6 m kiskon alapinnasta(mm)	1,1 m kiskon alapinnasta(mm)
Joulukuu 1995	-	3,6	3,6
Maaliskuu 1996	4,0 *)	2,6	2,4
Elokuu 1996	2,6 **)	3,5	3,4

*) Mitattu kuormatun malmijunan seistessä paikallaan

**) Paikallaan seisova koejuna, akselipaino 250 kN

Voidaan todeta, että tukikerroksen alapinta asettuu alttiiksi pystysuuntaiselle muodonmuutokselle, joka on välillä 0,15 – 3,6 mm riippuen pohjamaan kovuudesta eri radanosilla ja eri aikoina. /1/

Tuloksista on tässä tapauksessa vaikea löytää minkäänlaista riippuvuutta junan nopeuden suhteen. Kyseessä olivat suhteellisen alhaiset nopeudet ja tarkastetusti sileät pyörät. Tulokset taulukossa 2.9. /1/

Taulukko 2.9 Raidesepelin muodonmuutos 0,6 metrin syvyydellä kiskon alapinnasta 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainoilla, sekä prosentuaalinen muutos siirryttäessä 250 kN:sta 300 kN:iin. /1/

Nopeus (km/h)	Akselipaino 250 kN (mm)	Akselipaino 300 kN (mm)	Prosentuaalinen kasvu (%)
40	0,42	0,50	19,1
60	0,44	0,51	15,9
70	0,40	0,47	17,5

Taulukon 2.9 tulokset viittaisivat siihen suuntaan, että muodonmuutos olisi suoraan suhteessa kuorman lisääntymiseen tai aavistuksen alhaisempi. Mittausten määrä on kuitenkin riittämätön perusteellisempien johtopäätösten vetämiseksi. /1/

2.8.2 Amerikkalainen tutkimus

Yhdysvalloissa oli v. 1996 käynnissä projekti, jota kutsuttiin nimellä "FAST Program" (FAST = Facility for Accelerated Service Testing). FAST/HAL (Heavy Axle Load) rakennutti lyhyehkön koeradan, jolla oli tarkoitus testata, miten erisuuruiset akselipainot vaikuttavat eri radanosiin. Testissä tutkittiin mm. neljää eri tukikerrosmateriaalia: dolomiittia, kalkkikiveä, graniittia ja diabaasia. /36, 37/

Vuonna 1985 koerata otettiin käyttöön ja sillä ajettiin 300 kN:n akselipainoilla. Ensimmäisen koeosuuden kokonaisliikennemäärä oli 160 Mbrt. Ensimmäinen vaihe lopetettiin maaliskuussa 1988, jonka jälkeen aloitettiin toinen osuus 350 kN:n akselipainoilla. Tarkoitus oli tehdä vastaava koe kuin 300 kN:n akselipainolla. Huhtikuussa 1990 saatiin 160 Mbrt liikennemäärä täyteen koeradalla myös 350 kN:n akselipainoilla. Tämän jälkeen tutkimuksia laajennettiin hieman ja koeradalla ajatettiin vielä 300 Mbrt lisää liikennettä. Vuoden 1995 lopussa aloitettiin seuraava vaihe (III) kertaamalla aikaisempia kokeita. Akselipaino oli edelleen 350 kN, mutta nyt käytössä oli teli-ratkaisultaan uudenaikaisempi vaunu, jolla kiskon kulumisen oletettiin olevan pienempi. /36, 37/

Neljän eri tukikerrosmateriaalin kestävyyttä arvioitiin 350 kN akselipainoilla. Yleisesti voidaan todeta kaikkien neljän materiaalin selvinneen kokeesta kohtuullisesti. Tämän uskotaan johtuvan koeradan paikallisesta ilmastosta, jota luonnehditaan keskikuivaksi. /36, 37/

Kalkkikiven ja graniitin kohdalla voitiin heti tehdä vertailuja 300 kN:n ja 350 kN:n akselipainojen välillä. Kalkkikivellä suurempi akselipaino aiheuttaa selvästi suurempaa materiaalin jauhautumista ja kunnossapitotarvetta. Graniitin kohdalla jauhautuminen (hienoneminen) riippui selvästi kokonaisliikennemäärästä eikä niinkään akselipainosta. /36,37/

Yhteenvedossa vertailtiin kokeita 300 kN:n ja 350 kN:n akselipainoilla. Vielä 750 Mbrt:n liikennemäärän jälkeenkin ero 300 kN:n ja 350 kN:n akselipainojen synnyttämissä hienoaineksissa oli hyvin pieni. Kahden materiaalin (graniitti ja diabaasi) kohdalla ei ollut lainkaan eroa jauhautumisessa. Kahdella huonommalla materiaalilla jauhautuminen on suurempaa 350 kN:n kuin 300 kN:n akselipainolla. Vertailutulosta heikentää hieman se, että sepeli tuli tietyissä tapauksissa eri louhoksilta ja alkuperäinen raekokojakauma vaihteli. /36, 37/

2.9 Päätelmiä

Pohjamaan kovuudella on suuri merkitys tukikerrosmateriaalin muodonmuutokselle. Kun radassa on pehmeä pohjamaa, se johtaa suurempiin muodonmuutoksiin raide-sepelissä kuin jos pohjamaa on kova. Tiettyyn kuormatasoon saakka muodonmuutos on suoraan verrannollinen kumulatiivisiin akselitonneihin (log), mutta tietyn kriittisen rajan ylitettyään muodonmuutokset rupeavat kiihtymään. Mitä pehmeämpää pohjamaa on, sitä alempi on kriittinen kuormataso, jonka jälkeen muodonmuutokset kiihtyvät. /1/

Tukikerroksen muodonmuutoksista korkeiden akselipainojen alla on eriäviä mieltäpitoja. Pienimuotoisissa laboratoriokokeissa, kuten kolmiaksaalikokeissa ja simulaatiokokeissa, muodonmuutos on kasvanut lisääntyvän kuormituksen myötä. Kenttäoloissa todellisissa oloissa tehtyjen kokeiden tuloksena on todettu, että muodonmuutos on minimaalinen, kun akselipaino nostetaan 300 kN:sta 350 kN:iin ja kyseessä on hyvälaatuinen kivilajike. Huonompilaatuisilla lajikkeilla muodonmuutos on ollut jo selvästi havaittava. Näiden kokeiden perusteella voidaan päätellä, että hyvälaatuisilla raide-sepeleillä kokonaistonnimäärä on muodonmuutosten osalta selvästi akselipainoa määräävämpi tekijä. /1/

Useiden maiden ratahallinnot ovat todenneet tukikerroksen kunnossapitokustannusten lisääntyneen, kun tukikerroksen kuormitusta on lisätty. Se viittaisi muodonmuutosten lisääntymiseen. Suuri osa kasvavasta kunnossapitotarpeesta saattaa kuitenkin johtua enemmänkin uudelleenkerrostumisen aiheuttamista painumisista kuin varsinaisesta muodonmuutoksesta. Uudelleenkerrostumista taas tapahtuu esim. pehmeän pohjamaan sekoittuessa tukikerroksen kanssa, kun pohjamaasta "pumppautuu" hienoainesta tukikerrokseen. Lisäksi pehmeässä pohjamaassa voi tapahtua elastisia muodonmuutoksia. /1/

Yhteenvetona voidaan todeta, että kasvavat akselipainot eivät vaikuta hyvälaatuisen raidesepelin kestävyysajan mainittavammin niin kauan, kun akselipaino pysyy tietyn kriittisen painon alapuolella ja kokonaistonnimäärä ei lisäännä. /1/

Eri maissa tehdyissä tutkimuksissa on lähes universaalisesti todettu, että radan geometrian huononeminen on lineaarinen akselipainoon nähden, kun kyseessä on hyvälaatuinen tukikerros ja myös hyvälaatuinen pohjamaa. Niin kauan kun painot eivät ylitä pohjamaan kantavuutta (hyvän pohjamaan tapauksessa), tämä lineaarisuus on voimassa. /10/.

Täten tutkimuksessa hyvän pohjamaan tapauksessa ja edellä todetun (Suomessa on hyvälaatuisia raidesepeliä) perusteella voidaan todeta vauriokertoimen olevan $25/22,5 =$

1,11. Kun akselipainoa nostetaan 225 kN:sta 250 kN:iin, se siis aiheuttaa tukikerroksessa 11 % huononemisen akselia kohden. Tällöin myös kokonaistonnimäärä kasvaa tuon 11 %. Tämän tutkimuksen lähtökohtana oli kokonaistonnimäärän pysyminen muuttumattomana, eli ko. akselipainon noston vaikutukset hyvälaatuiseen raidesepeliin hyvälaatuisen pohjamaan tapauksessa on nolla. Sepelin huononeminen ja kunnossapitokustannukset on oletettu toisistaan riippuvaisiksi, mitään muutakaan tietoa ei ole tullut ilmi tässä tutkimuksessa.

2.10 Raideseppelin elinkaarikustannukset

Raideseppelin lujuuden vaikutusta tukikerroksen elinkaarikustannuksiin voidaan arvioida laskemalla kullekin sepeliluokalle taulukon 2.10 mukaisilla arvoilla kestoikä vuosissa tietyllä vuotuisella liikennemäärällä. Kullekin sepeliluokalle voidaan sitten arvioida sen elinkaaren aikana syntyvät kustannukset. Kun kustannukset muunnetaan nykyarvoon, eri lujuusluokilla saavutettavia kustannuksia voidaan vertailla. /19/

Taulukko 2.10 Eri lujuusluokkaisesta raidesepelistä koostuvan tukikerroksen kestoikä betonipölkkyraiteessa. /19/

Raideseppelin lujuusluokka	Kestoikä Mbri (vähintään)
R1	430
R2	350
R3	250
R4	150

Taulukkoon 2.11 on laskettu yhteen kullekin sepeliluokalle eri suurilla vuotuisilla liikennemäärillä tukikerroksen puhdistuksista ja jäännösarvosta muodostuva kustannus nykyarvossa muunnettuna yksikköön mk/t. Kun tämä kustannus lisätään hankintakustannukseen, markkamääristä voidaan suoraan nähdä elinkaarikustannuksiltaan edullisin sepeliluokka. Taulukon 2.11 laskennassa käytettiin seuraavia oletuksia: /19/

- Sepelimenekki: 2,1 m³/raidemetri
- Tukikerroksen tiheys: 1,8 t/m³
- Sepelimenekki: 3,8 t/raidemetri
- Tarkastelusykli: 40 vuotta
- Raideseppeliluokkien kestoikä taulukon 2.10 mukaiset
- Tukikerroksen puhdistuksen kustannus: 350 mk/raidemetri (sis. sepelin)
- Laskentakorko 6%
- Tukemiskustannuksia ei huomioitu, ero luokkien välillä oletettiin pieneksi
- Jäännösarvo tukikerrokselle laskettiin 40 käyttövuoden kohdalla kertomalla puhdistuskustannus (350 mk/m) jäljellä olevan kestoian suhteella alkuperäiseen kestoikään/19/

Taulukko 2.11 Puhdistuksesta ja jäännösarvosta aiheutuva lisäkustannus (hankintakustannusten lisäksi) nykyarvossa eri raidesepeliluokilla ja vuotuisilla liikennemäärillä (mk/t). Negatiiviset kustannukset ilmentävät, että tukikerrosta ei tarvitse puhdistaa tarkastelujakson (40 vuotta) aikana. Tällöin jäännösarvo aikaansaa negatiivisen kustannuksen. /19/

Raidesepelin lujuus- luokka	Rataosuuden vuotuinen liikennemäärä (MGT)						
	3	5	7	10	12	15	20
R1	-6,40	-4,80	-3,10	-0,60	3,70	12,10	25,30
R2	-5,90	-3,80	-1,80	4,40	11,30	21,20	39,00
R3	-4,70	3,50	3,50	17,70	26,40	42,40	68,70
R4	-1,90	9,30	24,30	49,80	66,90	93,70	

Jos tiedetään eri lujuusluokkaisten sepelien saatavuus eri paikoista ja kuljetuskustannukset (etäisyydet tiedossa), voidaan em. perusteella arvioida kokonaistaloudellisesti edullisin hankinta raidesepeliksi.

3. PÖLKYT JA KIINNITYKSET

3.1 Yleistä

Rataverkolla on käytössä lähes yksinomaan betoni- ja mäntypuuratapölkkyjä. Pääradoille ja yleensäkin vilkasliikenteisille radoille ollaan vaihtamassa betoniratapölkkyt. Suomen rataverkolla on noin 15 miljoonaa ratapölkkyä, joista 4 miljoonaa on betoni-pölkkyjä ja 11 miljoonaa puupölkkyjä. Vuonna 2000 valmistettiin noin 600 000 uutta betonipölkkyä Suomen rautateitä varten. Yhden pölkyn tehdashinta on runsaat 200 mk ja sen hinnaksi vaihtotoineen tulee lopulta noin 500 mk. Myös uusia puupölkkyjä tarvitaan edelleen ja niitä on viime vuosina valmistettu vuosittain enimmillään 150 000 kpl. /12,29/

3.2 Ratapölkkyjen valinta

Eri ratapölkkyjen käyttöalueet määritetään liikenteen radalle asettamien vaatimusten, kiskopainon, radan rakenteen, ratapölkkyjen ominaisuuksien ja teknistaloudellisten näkökohtien perusteella./26/

Ratapölkkyjen yleiset tehtävät ja vaatimukset:

- Antaa kestävä alusta kiskon kiinnityksille ja kiskon jalalle
- Antaa mahdollisimman tasalaatuinen alusta kiskoille ja yhdessä kiskon kiinnityksen kanssa
- Antaa riittävän sivujäykkyyden sekä poikittais- että pituussuunnassa
- Suurentaa tukikerrosta kuormittavaa pinta-alaa
- Kestää mekaaniset rasitukset sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä
- Antaa edellytykset riittävälle sähköiselle eristykselle kiskojen sekä tukikerroksen ja kiskon välillä./26/

3.3 Puuratapölkkyt

3.3.1 Yleistä

Puupölkyn elinikä on noin 25 - 30 vuotta. Se, että vuodessa tarvitaan jopa 150 000 uutta puupölkkyä johtuu siitä, että viime vuosina ostetut pölkkyt kestävät vielä kauan. Muutaman huonokuntoisen pölkyn takia ei koko rataa kannata korjata, ja puupölkkyt heikkenevät vaihtokuntoon varsin yksilöllisesti. Puupölkyn ikää pitkittävä lahonsuojajaine on väkevä kreosootti, joka on ympäristölle haitallinen. /6,12,29/

3.3.2 Mitoitus

Taulukossa 3.1 ovat tällä hetkellä sallitut nopeudet mäntypuuratapölkkyille raidesepeillä varustetuilla radoilla ja eri suuruksilla kiskopainoilla.

Taulukko 3.1 Mäntypuوراتapölkyille teoreettisesti sallitut nopeudet ja akselipainot eri kiskopainoilla. /26/

Nopeus (km/h)	K30 (kN)	K43 (kN)		54 E 1 (kN)		60 E 1 (kN)
		soraraide	sepeliraide	soraraide	Sepeliraide	
160	–	–	–	–	205	225
150	–	–	–	–	210	230
140	–	–	–	–	215	230
130	–	–	–	–	215	235
120	–	–	–	–	220	240
110	–	–	180	–	220	240
100	–	160	200	200	225	245
90	100	170	210	205	230	250
80	120	180	225	210	240	255
70	160	190	230	215	245	260
60	160	200	235	220	250	265
50	190	225	235	225	255	265
40	200	230	240	235	265	265
30	200	235	245	245	265	265
20	225	245	250	250	265	265

3.3.3 Kestävyys

Akselipainon nouseminen 225 kN:sta 250 kN:iin aiheuttaa aluslevyn nopeutuvaa painumista pölkkyyn sekä pölkyn huononemista yleensä. Suuremman akselipainon aiheuttama lisäys pystykuormitukseen johtaa lisääntyneisiin aluslevy/pölkky -kosketusvoimiin ja lisää aluslevyn leikkautumista puupölkkyyn. Tämä puolestaan johtaa suurempaan määrään vahingoittuneita pölkkyjä. Pohjoisamerikkalaisten standardien mukaan puupölkky on vaihdettava, kun aluslevyn painumisen aiheuttama pölkkyvaurio ulottuu 30-40% syvyydelle pölkyn paksuudesta (korkeudesta). On myös huomattava, että samalla kun pölkyn leikkautuminen lisääntyy, kiskot tahtovat kallistua ulospäin aiheuttaen raidelevyiden suurenemista ja huonoa kosketusta pyörän ja kiskon välillä. Tämä vaatii lisääntyvää kunnossapitoa levyjen ja niiden kiinnitysten kiristämisen/uusimisen osalta. /40/

Haastatellut kotimaiset asiantuntijat olivat myös sitä mieltä, että aluslevyn painuminen pölkkyyn nopeutuu, kun akselipainoa korotetaan. Tällöin ruuvit jäävät ylös ja kiinnike löystyy ja pääsee liikkumaan. Kiinnityksiä joudutaan kiristämään entistä nopeammin

esim. holkittamalla pölkkä. Aluslevyn koolla on tässä myös merkitystä, pienempi painuu nopeammin. Tämä ongelma esiintyy lähinnä mäntypuupölkyillä. Kovapuupölkyt kestänevät akselipainon korotuksen ilman lisääntyvää ongelmaa. /23, 30, 32, 33, 34, 38/

3.4 Betoniratapölkyt

3.4.1 Yleistä

Vanhojen B63...B75 betonipölkköjen arvioitu elinikä on 25–30 vuotta. Vuoden 1982 jälkeen valmistettujen betonipölkköjen arvioitu elinikä on ainakin 40 vuotta. Sinä aikana pöllyn osia ja kiinnikkeitä, joiden elinikä on vähemmän kuin 40 vuotta, vaihdetaan vähintään kerran. Eri osien arvioitu elinikä on 8-20 vuotta; eristimet vaihdetaan 4 kertaa, kumiset välilevyt 2 kertaa ja e-clip-jouset kerran. /6, 12, 26/

Betoniratapölkkä on muotoiltu siten, että se vastustaa tehokkaasti liikettä tukikerroksessa, joten se pysyy paremmin paikoillaan. Lisäksi betoniratapöllyn metripaino on noin 2,5-kertainen puuratapölkköyn nähden. Betoniratapölkköraiteen sivuttaisvastus onkin 50...80 % suurempi kuin puuratapölkköraiteen. Betoniratapölkyt soveltuvat siten teknisesti paremmin kuin puuratapölkyt jatkuvaksi hitsatuille 54 E 1 ja 60 E 1 -raiteille. /26/

3.4.2 Mitoitus

Rataverkoltamme löytyy monen ikäisiä betoniratapölkköjä, vanhimmat vuodelta 1963. Eri pölkyille sallitut nopeudet eri akselipainoilla ja eri kiskoilla vaihtelevat suuresti. Nämä arvot on mainittu taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 Betonisten ratapölkkyjen mitoituksessa sallitut suurimmat nopeudet ja akselipainot. /9/

Max nopeus (km/h)	Max akselipaino (kN)						
	C=0,4 N/mm ² , a=610 mm, c _{min} q _{yk} =135 kN/mm, κ=0,2, tavarajuna, t=2.						
	B75	B86	B88	BP 89, BP 99		B97	
	54 E 1	54 E 1	60 E 1	54 E 1	60 E 1	54 E 1	60 E 1
260	175	205	205	190	200	185	195
250	180	210	210	190	205	185	200
240	180	215	210	195	205	190	205
230	185	215	215	195	210	195	205
220	185	220	220	200	210	195	210
210	190	220	220	200	215	200	210
200	190	225	225	205	220	200	215
190	195	230	230	205	220	205	220
180	195	230	230	210	225	205	220
170	200	235	235	215	230	210	225
160	205	240	240	215	230	215	230
150	205	245	240	220	235	215	230
140	210	245	245	225	240	220	235
130	215	250	250	225	240	225	240
120	215	255	255	230	245	225	240
110	220	260	260	235	250	230	245
100	225	265	260	240	255	235	250
90	225	270	265	245	260	240	255
80	230	275	270	245	265	245	260
70	235	275	275	250	270	245	265
60	240	280	280	255	275	250	270

Taulukosta 3.2 nähdään, että kaikilla betonipölkkyraiteissa käytössä olevilla pölkkytyypeillä suurin sallittu nopeus 250 kN:n akselipainolla ei riitä tavarajunien yleiseen nopeuteen 80 km/h.

Kaikkien haastateltujen asiantuntijoiden mielestä betonipölkkyt, ja niistä ainakin kaikki vuoden 1986 jälkeen valmistetut, kestävät 250 kN:n akselipainon ilman ongelmia. /23, 28, 30, 32, 33, 34, 38/

Mikäli B75- ja vanhemmille betoniratapölkkyille sallitaan 250 kN akselipainoinen liikenne, raiteen loppuun kuluminen on nopeaa. Tällöin on muutaman vuoden sisällä valmistauduttava raiteen uusimiseen.

3.4.3 Kestävyysslaskelma

Tuoreen tutkimuksen mukaan betonipölkkyissäkin voi ilmetä vaurioita 250 kN:n akselipainoilla. Kyseisessä tutkimuksessa tarkasteltiin betonisten pölkkyjen kestävyyttä alku-peräistä tarkoitusta suuremmilla kuormilla. Tutkimuksessa laskettiin betonirakenteiden mitoitukseen käytettävällä tietokoneohjelmalla eri nopeuksilla ja akselipainoilla pölkkyille tuleva kuorma, sekä tästä pölkkyille aiheutuvat voimasuureet. /17/

Pölkyn kestävyys vaikuttaa suuresti se, minkälaisen voiman se saa kiskolta. Merkittäviä tekijöitä ovat tällöin alusrakenteiden alustaluku ja kiskon taivutusjäykkyys. Mitä jäykempi kisko on, sitä paremmin se jakaa ja pienentää yhdelle pölkkyille tulevaa kuormaa. Mitä kovempi alusrakenne eli mitä suurempi alustaluku, sitä vähemmän pölkky painuu ja ottaa vastaavasti enemmän kuormaa kiskolta. /17/

Taulukon 3.2 tuloksista huomataan, että sallitut akselikuormat, joita ei tulisi ylittää, ovat monessa tapauksessa yllättävänkin alhaiset. Tämä koskee myös aivan uusimpia pölkkyjä. On kuitenkin otettava huomioon, että laskelmissa on käytetty varmuuskerrointa 2, joten välitöntä vaaraa ei liene olemassa pölkkyjen katkeamisiin nykyliikenteen alla. Ohjeita ja mitoituksia lienee kuitenkin syytä tarkistaa.

4. KISKOT JA LIITOKSET

4.1. Raidetyypit

4.1.1 Jatkuvakiskoraide

Jatkuvakiskoraide on raide, jossa kiskopituus on yli 300 metriä. Lämpötilan muutosten aiheuttamat kiskon pituuden muutokset on estetty kiskon päitä lukuun ottamatta. Kiskot, joiden pituus on 50–300 metriä, ovat sallittuja vain jk-raiteen valmistuksen aikana ja enintään 100 000 brt:n kuormituksen ajan. /26/

Jatkuvakiskoraide on yksi merkityksellisimmistä keksinnöistä nykyaikaisessa rata-tekniikassa. Suuria nopeuksia (≥ 160 km/h) ei voitaisi taloudellisesti toteuttaa ilman jatkuvakiskoista päällysrakennetta. Jatkuvakiskoraide mahdollistaa yli 120 km/h nopeuksien käytön. Uuden Jk-raiteisen radan suunnittelussa ja rakentamisessa on tavoitteena, ettei raiteeseen synny Jk-raiteelle haitallisia painumia. Jk-raidetta suositellaan käytettäväksi raiteilla, joissa liikenteen nopeus ylittää 50 km/h tai kuormitus on erityisen raskasta. /26/

4.1.2 Pitkäkiskoraide

Pitkäkiskoraide (Pk-raide) on raide, jossa kiskon pituus > 25 metriä, mutta ≤ 50 metriä. Suurin nopeus Pk-raiteella on 120 km/h, poikkeusluvalla 140 km/h. Pitkäkiskoraidetta voidaan käyttää silloilla vähentämään kiskonjatkosten sillalle aiheuttamaa sysäyskuormaa. /26/

Pitkäkiskoraidetta voidaan käyttää myös vajaalla sepelitukikerroksella olevilla radoilla silloin, kun kiskonkiinnitykset ovat Jk-raiteisiin soveltuvia. Pitkäkiskoraide tehdään aina sidekiskoin ja jatkosalueella lyhytkiskoraiteen pölkkyyjakoa noudattaen. Sidekiskot kiinnitetään poikkeuksetta neljällä sideruuvilla, jousialuslevyllä ja mutterilla. /26/

4.1.3 Lyhytkiskoraide

Lyhytkiskoraide (Lk-raide) on raide, jossa kiskon pituus ≤ 25 metriä. Lk-raiteiseksi rakennetaan vähäliikenteinen raide tai raide, jolla esiintyy Jk-raiteelle haitallisia painumia. Suurin nopeus Lk-raiteella on 120 km/h. Kaikki soratukikerrokselliset raiteet rakennetaan Lk-raiteisiksi. Myös kiskon valssausmenetelmä saattaa aiheuttaa raiteen rakentamisen Lk-raiteiseksi. Lyhytkiskoraide tehdään aina sidekiskoin kiskon pituuden mukaista ratapölkkyyjakoa noudattaen. Sidekiskot kiinnitetään poikkeuksetta vähintään neljällä sideruuvilla, jousialuslevyllä ja mutterilla. /26/

4.2 Kiskojen ominaisuudet

4.2.1 Kiskopainot

Eri kiskoluokat ja niille sallitut suurimmat nopeudet eri akselipainoilla on mainittu taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Ohjeelliset eri kiskoille sallitut suurimmat akselipainot ja nopeudet 2-akselisille tavaravaunuille sekä henkilövaunuille, joiden telien akseliväli on 2500 mm. /9/

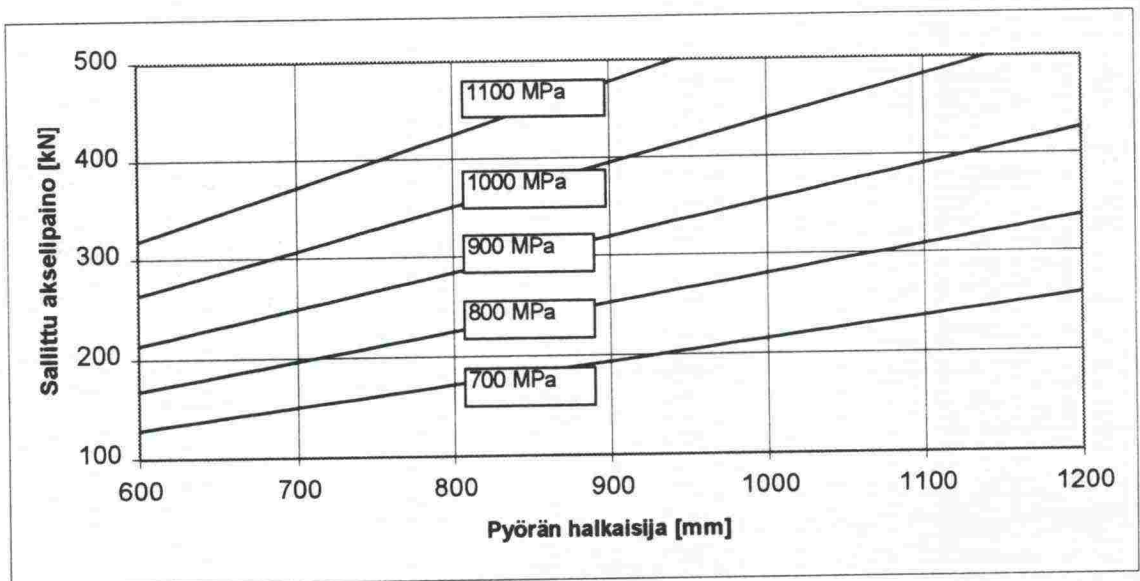
Rata-kiskon tunnus	Akseli-paino (kN)	Nopeus (km/h)	Akseli-Paino (kN)	Nopeus (km/h)	Akseli-paino (kN)	Nopeus (km/h)	Akseli-paino (kN)	Nopeus (km/h)
K30 *)	225	20	200	40	160	70	120	80
K33 *)	200	50						
K43 *)	245 *)	35 *)	225 *)	50 *)	210 *)	100 *)		
K43 S	245	35	225	60	210	110		
K60	250	30	225	50				
54 E 1	250	80	225	120	200	180	180	200
60 E 1	250	100	225	160	200	200	180	250

*) soratukikerros

Jos suurinta sallittua akselipainoa korotetaan 225 kN:sta 250 kN:iin, taulukon 4.1 arvot riittävät liikennöintiin tuolla korotetulla akselipainolla. Tavarajunien tavoitenopeus 80 km/h sallitaan 60 E 1- ja 54 E 1-kiskoille uudella 250 kN:n akselipainolla.

4.2.2 Kiskoteräksen kovuusluokat

Suomen rataverkolla on käytössä useiden eri valmistajien kiskoja. Radoissa olevat kiskot ovat hyvin pitkältä aikaväliltä ja lisäksi kiskoteräksiä on eri kovuutta. Kuvassa 4.1 nähdään sallittu akselipaino eri kiskomateriaalien murtolujuuksilla. Tuloksissa on huomioitu dynaaminen painon siirtymä (20 %) kaarteissa. /15/



Kuva 4.1 Sallittu staattinen akselipaino, parametrinä kiskon vetomurtolujuus. /15/

Suomessa on yleisesti käytössä pyöränhalkaisija 920 mm. Kuvan 4.1 perusteella voidaan todeta, että 250 kN:n akselipainolla kestävyysongelmia on odotettavissa 700 MPa-kiskolle, 800 ja 900 MPa-kiskot taas kestänevät ko. akselipainon. Kuvassa esiintyviin kiskomateriaalin luokkiin kuuluvat eri valmistajien kiskot ja kiskopainot seuraavasti:

- 700 MPa : K30, K43, Imatra 54 E 1
- 800 MPa : AM, Imatra+
- 900 MPa : ”uudet” 54 E 1, kaikki 60 E 1
- 1200 MPa : erikoiskova, käytetään joissakin kaarteissa

Kaavalla (1) voidaan laskea, montako ylitystä eri kiskolaadut kestävätkä uudella 250 kN:n akselipainolla, ennen kuin niihin syntyy vaurio: /7/

$$(1) \quad n^{0,039} = 12,8 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{murto} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{r}{Q}}$$

n on kuormituskertaluku
 σ_{murto} 700 – 900 (1200) MPa kiskolaadusta riippuen
 γ varmuuskerroin, tässä on käytetty lukua 1,1, nopeuksien kasvaessa on käytettävä esim. lukua 1,2
 r 460 mm, pyörän säde
 Q 125 kN

Kaava on voimassa kuormituskertaluvuille välillä $10^4 - 2 \cdot 10^6$. /7/

Jos kisko kestää yli 2 miljoonaa ylitystä, katsotaan silloin, että kuormitus ei sitä väsytä.

250 kN:n akselipainolle saadaan seuraavat kiskovaurioon johtavat ylityskerrat:

- 700 MPa-kisko : 93376 ylitystä, mikä vastaa 2,3 Mbrt:ia
- 800 MPa-kisko : 2,85 Milj. ylitystä
- 900 MPa-kisko : 59 Milj. ylitystä

Tulosten perusteella voidaan todeta, että kiskoon, jonka vetomurtolujuus on 700 MPa, tulee vaurioita, kun käytössä on 250 kN:n akselipaino.

4.3 Kiskonhionta

4.3.1 Ekskursio

Tämän tutkimuksen yhteydessä tutustuttiin ulkomaiseen kiskonhiontajunaan, joka oli juuri sattumalta käytössä Suomessa. Juna oli Lahden asemalla ja sen hetkinen työkohde oli Lahden ja Kouvolan välinen rataosuus. Junassa tutustuttiin itse hiontatekniikkaan, esim. hiontamootoreihin, hiontakiviin ja mittausantureihin junan seistessä paikallaan. Myös junan molempien päiden valvomoihin tutustuttiin ajon aikana junan suorittaessa varsinaista kiskonhiontaa. Eri valvontamonitoreissa näkyvistä lukemista, niiden merkityksestä ja säätömahdollisuuksista saatiin myös varsin kattava kuva. /5/

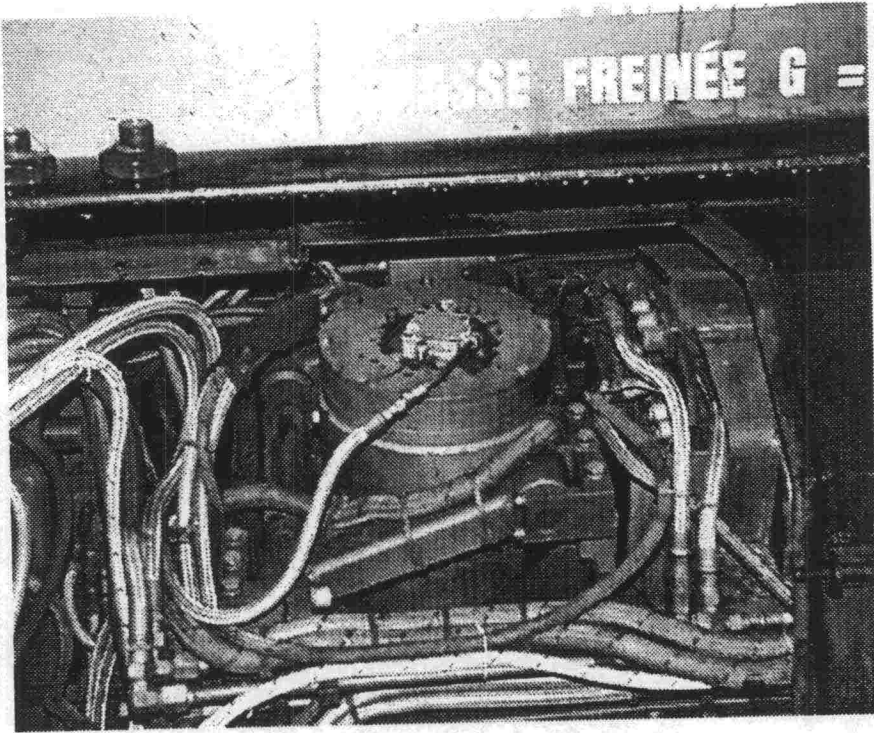
Kiskonhiontajuna on sveitsiläinen Speno. Jokaisessa hiontavaunussa on 8 hiontakiveä eli koko junassa niitä on 40. Itse hiontakivi on valettu eri aineosista, se sisältää mm. hiekkaa ja alumiinia. Ranskassa nopean TGV-junan kiskot hiotaan kaksi kertaa vuodessa ja tällöin kaksi tällaista hiontajunaa yhdessä (80 kivinen) tekee ainoastaan yhden ylityksen. Eri maiden käytäntö kiskon hionnassa vaihtelee. Toiset tekevät ennakoivaa hiontaa esim. kerran vuodessa ja toiset suorittavat perusteellisen korjaushionnan kerran kymmenessä vuodessa. Sopiva hionta on karkeasti ottaen sellainen, että kiskosta hiotaan pois 0,1 mm 10 milj.brt liikennemäärää kohti ko. osuudella. /5/

Hiottavana ollut Lahti-Kouvola -radan Lahden päästä alkava rataosuus vaati keskimäärin kolme hiontajunan ylityskertaa. Huonoissa kohdissa, esim. joissain kaarteissa, vaadittiin jopa viisi ylityskertaa. Tältä junalta vaadittava työpanos on 6300 m valmiiksi hiottua kiskoparia työvuoroa kohden, joka taas on noin 7 tuntia yöllä eli kello 23-06. Hiontajunan nopeus kiskoja hiottaessa on normaalisti noin 5,5 km/h. Kiskoja ei pystytä hiomaan tasoristeysten kohdalla purkamatta ympäröiviä rakenteita, mikä on kallista ja vie aikaa, koska rakenteet joudutaan myös asentamaan uudelleen. Tämän vuoksi tasoristeysten kohdat jäävät yleensä hiomatta. /5/

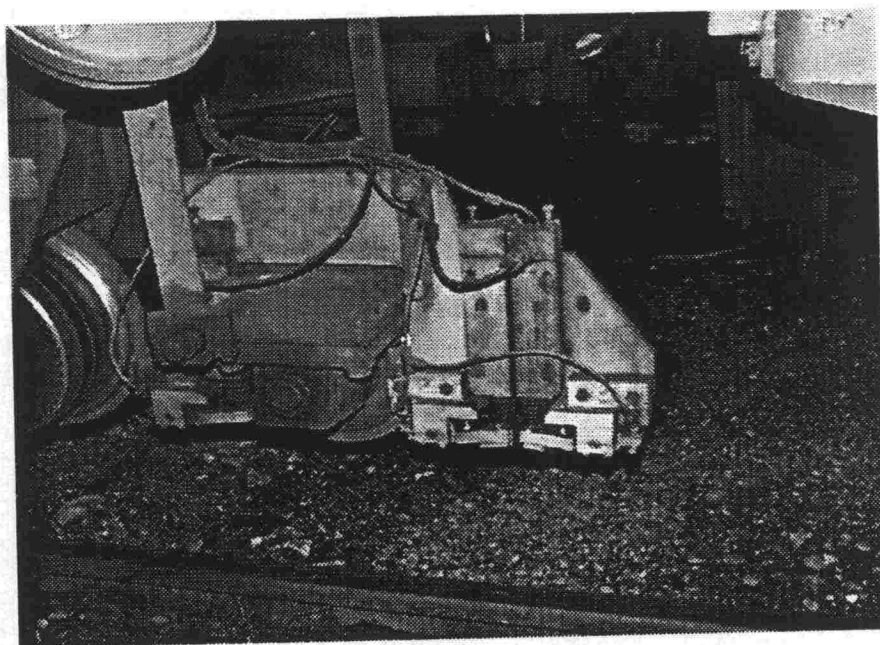
Yhdessä junan viidestä hiontavaunusta hiomakivien maksimikallistus on sisäpuolella -70 astetta ja ulkopuolella +30 astetta. Tällä vaunulla voidaan tehdä suuriakin korjauksia kiskoprofiiliin. Muiden neljän vaunun maksimikallistukset ovat sisäpuolella -30 astetta ja ulkopuolella +15 astetta. Vaunuissa sähkömoottorit painavat hiontakiviä kiskoja vasten, maksimivirta on 40A/moottori, yleisesti käytössä on 15-30A alue. Moottorit ovat vesijäähdytteisiä, mikä mahdollistaa pitkätkin työvuorot moottorien kuumenematta liikaa ja vesi vuorostaan jäähdytetään lauhduttimissa. Hionnassa syntyvä pöly imetään ylös säiliöihin. Noin 80 % pölystä saadaan talteen. Hiontamoottori on esitetty kuvassa 4.2. /5/

Juna mittaa kiskojen muotoa ja mittoja jatkuvasti. Junan toisessa päässä on lasermittari sekä lisäksi kolme anturia molemmille kiskoille erikseen. Lasermittarilla mitataan kiskojen profiilia. Anturit mittaavat kiskoihin syntyneitä aaltoja; lyhyille, keskipitkille ja pitkille aalloille on kaikille omat anturinsa, kuva 4.3. Kiskojen hiontaa aloitettaessa ajetaan ensiksi junan mittauspää edellä, jotta alkutilanne ja tarvittavat toimenpiteet selviäisivät. Kohteen viimeinen hionta tehdään niin, että mittausyksikkö on junan loppupäässä. Tällöin tarkka lopputulos saadaan selville saman tien näytöistä ja arvoista. Kiskon hionta meneillään kuvassa 4.4. /5/

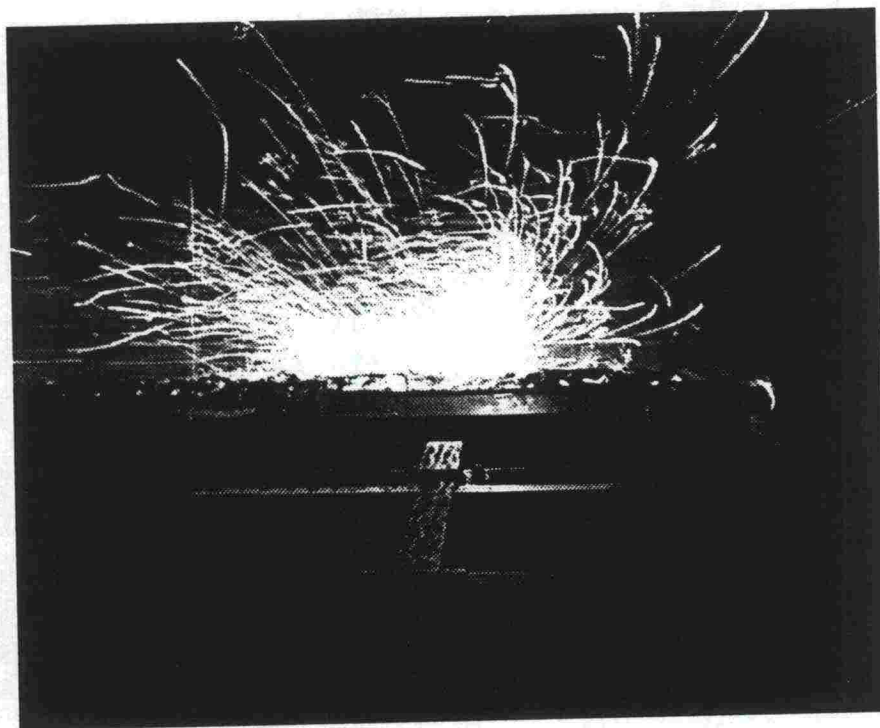
Junan miehistön mielestä kiskojen hionatarve syntyy suurista liikennemääristä (brt), ei niinkään korkeista akselipainoista. Hionatarvetta aiheuttavat myös kalustotekniset ongelmat ja veturinkuljettajien ajotavat. Jos kuljettaja vain lisää voimaa, joko junan lähtiessä liikkeelle tai muuttaessa suuntaa, vaikka pyörät lyövät tyhjää jo ennestäänkin, se aiheuttaa kiskon kulkupintaan aaltoja. Kulkupinnassa esiintyviä syviä vaurioita ei hionnalla pystytä poistamaan. Hiottun kiskon kulkupinnan ulkonäkö selviää kuvasta 4.5, hiontajälki on selvästi havaittavissa. Kuvassa keskellä näkyy kiskon leimuhitsi. /5/



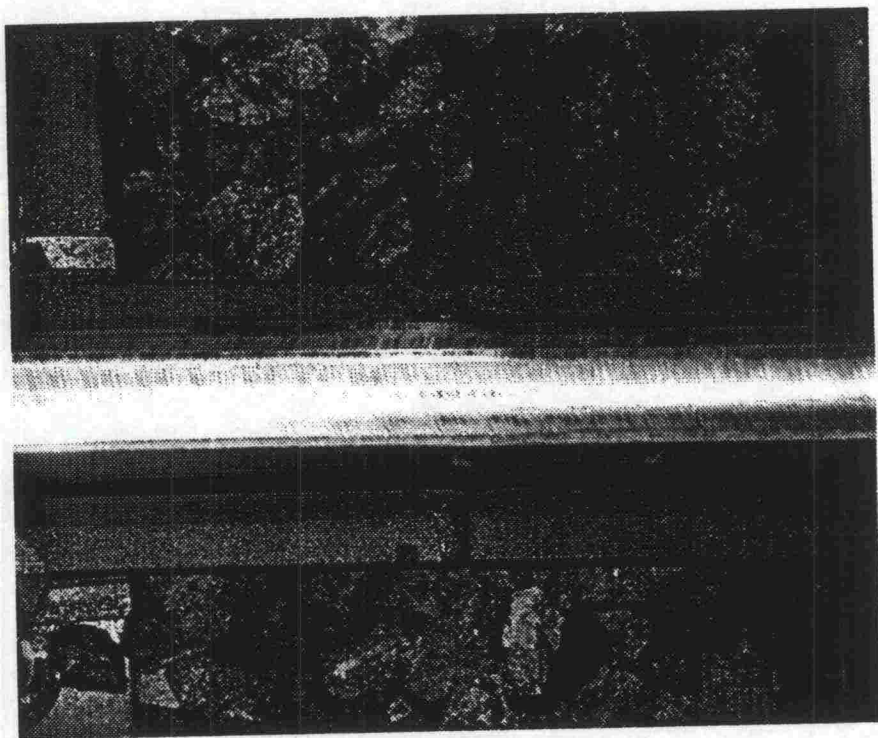
Kuva 4.2 Vesijäähdytteinen ja hydraulisesti säätävä hiontamoottori. /5/



Kuva 4.3 Hiontajunan mittausanturit. /5/



Kuva 4.4 Hionta käynnissä yöaikaan. Kuva otettu ylhäältä, junan kyydistä/5/



Kuva 4.5 Kiskon ulkonäkö välittömästi hionnan jälkeen./5/

4.3.2 Ulkomaiset kokemukset

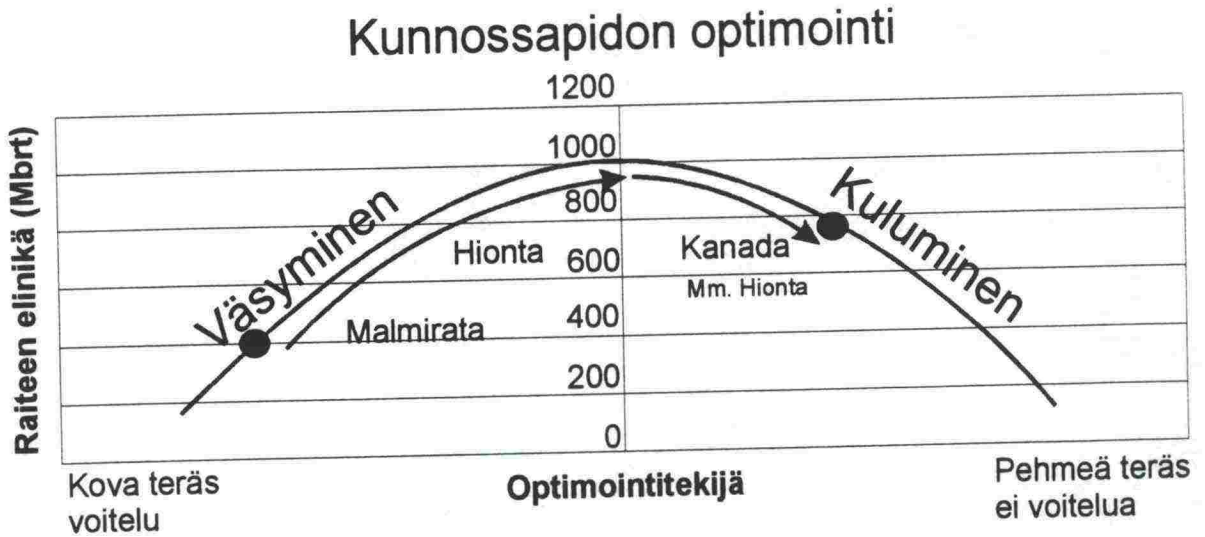
Muualla maailmassa kiskon toistuva hiominen kunnossapitotarkoituksessa on yleisesti käytetty menetelmä. Yhdysvalloissa, Kanadassa ja Australiassa kunnossapitotarkoituksessa tehtävä ennakoiva kiskonhionta on yleisessä käytössä raskaan liikenteen radoilla. Hionnan rinnalla käytetään usein myös kiskon voitelua. Näillä opeilla on kiskon elinikä onnistuttu jopa kaksinkertaistamaan hiomattomaan ja voitelemattomaan verrattuna. /10,41/

Vuonna 1997 Burlington Northern and Santa Fe -yhtiön toimeksiannosta National Research Council of Canada rupesi kehittämään hiontamenetelmää raskaan liikenteen radoille. Tarkoitus oli saada aikaiseksi jonkinlaiset ohjeet ja ohjearvot siitä, milloin kiskoja tulee hioa. Tuloksena päädyttiin seuraaviin suositeltaviin hiontaväleihin:

- Pienisäteiset kaarteet (kaarresäde ≤ 700 m): 15 Mbrt:n liikennemäärä
- Loivat kaarteet: 30 Mbrt:n liikennemäärä
- Suorat rataosuudet: 45 Mbrt:n liikennemäärä/15/

Hiontavälisuosituksesta huomaa, että erot kaarteidenkin välillä ovat jopa kaksinkertaiset ja ero suoran radan ja pienisäteisen kaarteiden välillä kolminkertainen.

Kiskon eliniän optimoiminen kunnossapitotarkoituksesta on vaativa prosessi, jossa on monta muuttujaa. Tuosta optimoinnista ja sen periaatteista on yhdenlainen versio kuvassa 4.6. Se on Ruotsin Banverketin tuotos, jossa vertailtiin malmiradan (Malmbanan) kiskon kulumista kanadalaisiin vastaaviin nähden. Kuvasta nähdään, että kiskon eliniän optimoinnissa on kyse tasapainoilusta kahden eri vauriotyyppin välillä eli materiaalin väsymisen ja kulumisen.



Kuva 4.6 Teknis-taloudellinen kulumismalli kiskon eliniän optimoimiseksi. /14/

Kuvassa 4.6 esiintyvä maininta voitelusta viittaa Pohjois-Amerikassa hyvinkin yleiseen kunnossapitotoimenpiteeseen. Siellä voitelua käytetään yhdessä hionnan kanssa raskaan liikenteen radoilla pidentämässä kiskon elinikää. Näitä toimenpiteitä yhdistäen Pohjois-Amerikassa on päästy jopa 1000 Mbrt:n elinikään kiskoilla. Ruotsissa radoilla käytetään runsaasti kiinteitä rasvauslaitteita pienisäteisissä kaarteissa. Suomessakin niitä on ollut nelisenkymmentä, mutta käyttövarmuus on ollut huono. Suomessa on nykyisin suurimassa osassa vetokalustoa laipanvoitelulaitteet.

4.4 Kiskohitsit

Kiskot hitsataan yhteen kiskohitsaamossa tai vaihtoehtoisesti kenttäolosuhteissa itse radalla. Nykyään Suomessa käytössä olevat hitsit ovat leimuhitsi, joka syntyy kiskohitsaamossa, sekä kentällä tehtävä termiittihitsi. Pohjoismaiden yhteisessä tutkimuksessa 1980-luvulla vertailtiin mm. erilaisia kiskovikoja mukaan lukien hitsit. Tutkimuksen tulokset ovat taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Erityyppiset kiskoviat pohjoismaissa vuosina 1981-1984./18/

Vikatyyppi	Tanska	Norja	Ruotsi	Suomi
Hitsivika	44 %	39 %	35 %	9 %
Väsyminen	20 %	13 %	35 %	34 %
Haurausmurtuma	14 %	8 %	6 %	2 %
Vika kiskonpäässä	12 %	26 %	12 %	Yhteensä 55 %
Muut	10 %	14 %	12 %	

Taulukosta 4.2 huomataan, että viat hitseissä on suurin erillinen vikaryhmä pohjoismaissa Suomea lukuun ottamatta. Kun suurimmat sallitut akselipainot olivat Norjassa 205 kN ja Tanskassa, Ruotsissa sekä Suomessa yhtenevä 225 kN, selitys vioille lienee

muualla. Norjassa (Ofotbanan) ja Ruotsissa (Malmbanan) ajettiin 250 kN:n akseli-painoilla, mutta ne eivät ole tässä vertailussa mukana, koska malmijunat liikkuvat omalla radallaan. Tämän aineiston yhtenä tulkintana on se, että Suomessa hitsit on tehty hyvin ja ne kestävät.

4.5 Kiskon kuluminen

Saksassa tehtiin v. 1957 koe, jossa kiskon kulumista tutkittiin kahdella eri akseli-painolla, 70 kN ja 300 kN. Koeosuudella oli S 64 (64 kg/m) kiskot ja se oli osa rataa, jolla kuljetettiin kivihiiltä teollisuuden käyttöön. Radalla oli myös kaarteita, joiden säde oli melko pieni eli 300-340m. Näissä kiskot olivat vaihdon tarpeessa jo kolmen käyttö-vuoden jälkeen. /4/

Kokeen tuloksena todettiin seuraavaa:

70 kN:n akselipainolla kiskon kuluma oli $0,268 \text{ cm}^2$ kuljetettua 10 milj. tonnia kohden.

300 kN:n akselipainolla kiskon kuluma oli $1,02 \text{ cm}^2$ kuljetettua 10 milj. tonnia kohden.

Kulumien suhdeluku: $1,02/0,268 = 3,8$

Akselipainojen suhdeluku: $30/7 = 4,3$

Loppupäätelmänä todettiin kiskon kuluman olevan lähes lineaarisesti riippuvainen akselipainosta, kun kokonaistonnimäärä ei muutu. Kulumien suhdeluku/akselipainojen suhdeluku on $3,8/4,3 = 0,89$. /4/

Saksalaisen tutkimuksen perusteella tämän tutkimuksen akselipainojen nosto 225 kN:sta 250 kN:iin johtaisi seuraavanlaiseen kiskon kulumisen lisääntymiseen:

$$(25/22,5 - 1) * 0,89 * 100 \% = 9,9 \% \text{ eli n. } 10 \%$$

4.6 Kunnossapitokustannusten jakaantuminen

Kiskon kunnossapitokustannusten jakaantuminen on ollut Malmiradalla (Malmbanan) taulukon 4.3 mukainen. Luvut perustuvat pääosin paikallisten asiantuntijoiden eli Banverketin Kirunan rata-alueen henkilökunnan haastatteluihin.

Taulukko 4.3. Kiskojen kunnossapitokustannusten jakaantuminen malmiradalla (Malmbanan). /2/

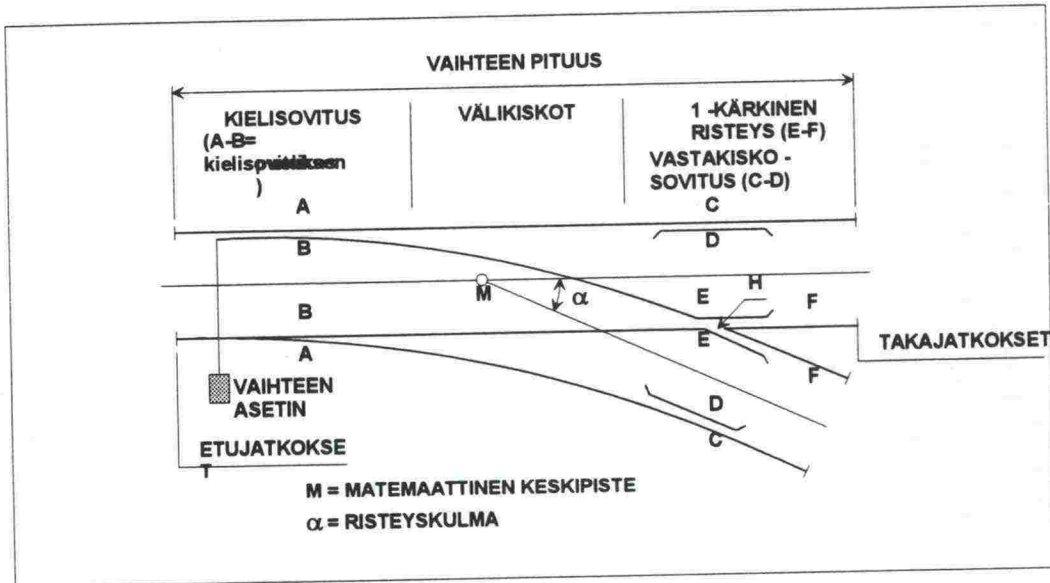
Kiskot	Hionta	Eristysjatkokset	Asennus	Muut
Kunnossapitokustannusten jakaantuminen (kisko)	20 %	30 %	40 %	10 %

Taulukon 4.3 tietoja vastaavaa kotimaista tilastoa ei tähän tutkimukseen ollut saatavilla.

5. VAIHTEET

5.1 Vaihteiden rakenne

Vaihteen pääosat ovat kielisovitus, vaihteen asetin, väliskiskot, 1-kärkinen risteys ja vastakiskosovitukset, kuva 5.1.



Kuva 5.1 Vaihteen pääosat. /27/

Kuvan 5.1 mukaisen vaihteen muut osat ovat seuraavat:

- A = tukikiskot
- B = kielet (tukikiskot ja kielet muodostavat yhdessä kielisovituksen)
- C = vastakiskojen tukikiskot
- D = vastakiskot (vastakiskon tukikisko ja vastakisko muodostavat yhdessä vastakiskosovituksen)
- E = siipikiskot
- F = kärkikiskot
 - kärkikiskot muodostuvat risteuksen kärkiosasta ja siihen hitsatuista jatkekiskoista
 - siipikiskot ja kärkikiskot muodostavat 1-kärkisen risteuksen
- M = vaihteen matemaattinen keskipiste
- H = risteuksen matemaattinen risteyspiste, risteuksen kulkureunojen leikkauspiste
- α = risteyskulma, joka ilmaistaan usein tangenttina, esim. 1:9. /27/

Vaihteen rakenteen tulee täyttää seuraavat perusvaatimukset:

- Junan tulee kulkea vaihteessa kulkusuunnasta, nopeudesta ja akselipainosta riippumatta pehmeästi ja sysäyksettömästi.
- Kielen asennon tulee olla tukeva ja kielen on liityttävä tiukasti tukikiskoon myös junan kuormituksen alaisena.
- Pieni vaihteen virhe ei saa suistaa junaa radalta.

- Vaihteen on oltava käännettävissä tarpeellisella varmuudella ja riittävän kevyesti kaikissa olosuhteissa.
- Vaihteen osien tulee olla kestäviä ja pienin kustannuksin kunnossapidettävissä.
- Vaihteeseen tulee voida asentaa tarpeelliset varusteet ottaen huomioon myös talvikunnossapito. /27/

5.2 Vaihteiden mitoitusperusteet

Vaihteet tulee mitoittaa staattisille akselipainoille junan nopeuden (V) mukaan seuraavasti:

- 60 E 1-vaihteet: 300 (+10 %) kN, kun $V \leq 100$ km/h
 250 (+10 %) kN, kun $100 \text{ km/h} < V \leq 120$ km/h
 220 (+10 %) kN, kun $V > 120$ km/h
 54 E 1-vaihteet: 250 (+10 %) kN, kun $V \leq 120$ km/h
 220 (+10 %) kN, kun $V > 120$ km/h

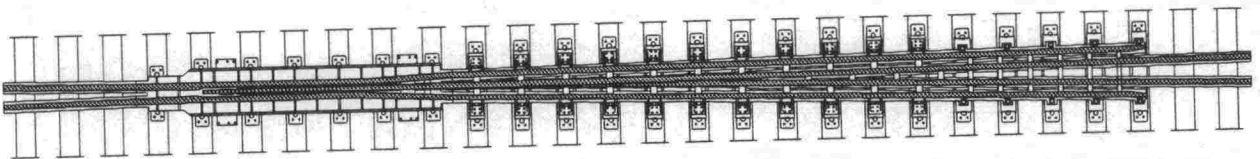
Vaihteet on mitoitettu suurimmalle sallitulle nopeudelle seuraavasti:

- Lyhyiden 60 E 1-vaihteiden suora raide 220 km/h (+10 %)
- Pitkien 60 E 1-vaihteiden suora raide 220 km/h (+10 % kiinteä risteys) ja 300 km/h (+10 % kääntyväkärkinen risteys)
- 54 E 1-vaihteiden suora raide 160 km/h (+10 %)
- Lyhyiden vaihteiden poikkeava raide 40 km/h (+10 %)
- Pitkien vaihteiden poikkeava raide 80 km/h (+10 % 1:15,5- ja 1:18-vaihteet) 140 km/h (+10 % 1:26-vaihteet)
- Raideristeykset 100 km/h (+10 %). /27/

Vaihteen on toimittava kaikilta osiltaan lämpötila-alueella -40...+50 astetta Celsiusta. Rakenteet on suunniteltava niin, että lunta, jäätä tms. kerääviä kulmia tai onkaloita on mahdollisimman vähän. /27/

Vaihteisiin kohdistuu dynaamisia pysty- ja vaakasuoria voimia. Niiden suuruus voi olla 2...3 -kertainen staattisiin voimiin verrattuna. Vaihteiden kunto ja tukikerroksen laatu vaikuttavat em. voimien suuruuteen. /27/

Yhdessä haastattelussa ehdotettiin raskaille akseleille sopivaksi vaihteeksi kääntyväkärkistä risteystä, kuva 5.2. Rajoittavana tekijänä toiminee kuitenkin hinta, joka on huomattavasti korkeampi kuin perinteisellä vaihdetyypillä. /32/



Kuva 5.2 Vaihteen YV60-5000/2500-1:26 kääntyväkärkinen risteys (modernimpi konstruktio). /27/

5.3 Vaihteiden vauriot

5.3.1 Vaurioiden synty

Vaihteissa liikenne kuluttaa tiettyjä vaihteen osia muita enemmän. Tällaisia osia ovat varsinkin vaihdekielet ja tukikiskot. Tämä korostuu varsinkin, kun vaihde sijaitsee kaarteessa sekä silloin, kun vaihteen poikkeavalla raiteella on paljon liikennettä. /13/

Risteysten kulumat syntyvät siitä iskevästä voimasta, jonka pyörien liikkuminen siipikiskolta risteysten kärkeen ja päinvastoin aiheuttaa. Kulumia voi aiheutua myös siitä suuresta pintapaineesta, joka aiheutuu pyörien liikkeestä uusissa vaihteissa, varsinkin pyörien tulo ja lähtö vaihteesta. Tämä johtuu siitä, että vasta pyörien vaikutuksesta pinnasta tulee kylmämuokattu ja näin ollen kovempi. Vastakisko on alttiina suurille rasituksille varsinkin, jos se sijaitsee sisäkaarteessa. Kulumaa syntyy, kun aivan edessä sijaitseva välikisko ja poikkeavan raiteen kärkekisko on kulunut. Pyörän akseli siirtyy silloin ulkokiskoon päin, jolloin pyörän takapuoli siirtyy liian aikaisin tuloväylälle. Tämä johtaa suuriin rasituksiin, jotka aiheuttavat kulumaa ja ääritapauksissa kiskon katkeamista. /13/

Vaihteet vaativat yleensä enemmän kunnossapitoa kuin raide muuten. Se johtuu pääasiassa niistä rasituksista, jotka syntyvät mm. epätasaisesta kiskon hamarasta ja sen aiheuttamasta muuttuvasta pyörän ja kiskon kosketuspinnasta. Nämä häiriöt aiheuttavat vetureille ja vaunuille heilahdusliikkeitä, mikä lisää kulumaa aiheuttavia rasituksia vaihteessa. /13/

Vaihteen kielijärjestelmän kunnossapito on vaativa tehtävä. Kiinnitysosilla on oltava hyvä sovitusta ja lisäksi on erityisen tärkeää, että ylityksellä kielenkärjestä tukikiskolle on tasainen kulkupinta. Kielien ja tukikiskojen korjaaminen tehdään hitsaamalla päälle uutta kulutusmateriaalia. /13/

Haastatellut asiantuntijat olivat sitä mieltä, että vaihteiden vauriotyypit eivät muutu akselipainon noston myötä, mutta samoja vaurioita esiintyy aiempaa nopeammin korotetulla akselipainolla. /23, 28, 30, 33, 38/

5.3.2 Vaurioiden jakaantuminen

Ruotsin malmiradan (Malmbanan) tarkoista tilastotiedoista löytyy myös tietoa vaihteiden kunnossapidosta ja sen kustannusten jakaantumisesta, taulukko 5.1. /3/

Taulukko 5.1 Vaihteiden kunnossapitokustannusten jakaantuminen Ruotsin malmiradalla (Malmbanan). /3/

Vaihteen osa	Osuus kunnossapitokustannuksista
Risteys	40 %
Kieli	30 %
Välikisko	15 %
Kiinnitykset, pölkyt ja tukikerros	15 %

Taulukon 5.1 vaihteiden kunnossapitokustannuksiin voidaan tehdä vielä lisäjako, jos oletetaan, että kielen ja välikiskon kuluma aiheutuu pääosin poikkeavan raiteen liikenteestä. Samoin oletetaan, että risteyksen kuluma aiheutuu yhtä paljon pääraiteen kuin poikkeavan raiteen liikenteestä. Lisäksi oletetaan tukikiskon kustannusten sisältyvän kielen kustannuksiin. /3/

6. KAARTEET

6.1 Kaarresäteet

Kaarregeometrian suunnittelussa on lähtökohtana:

- Tavoitenopeus ja mitoitusnopeus
- Suositeltavat arvot
- Raja-arvot kallistuksen vajaukselle ja liikakallistukselle
- Haluttu tasapainonopeus. /25/

Ratalinjan suunnanmuutokset tehdään siirtymäkaarilla ja ympyränkaarilla. Radan kaarevuus $1/R$ on suoralla osuudella 0 ja klotoidisiirtymäkaaren alueella se muuttuu suoraviivaisesti $0 \rightarrow 1/R$. Siirtymäkaaret ja kaaret on pyrittävä mitoittamaan tavoitenopeuden mukaan. Kaarresäteen tulee olla riittävän suuri, jotta raiteen kallistus ei tule liian suureksi. Toisaalta liian suuret kaarresäteet suurentavat kaarreosuuden pituutta, kallistus jää pieneksi lisäten kunnossapitokustannuksia. /25/

Mikäli olosuhteet sallivat, tulee kaarresäteet mitoittaa siten, että tavaraliikenneraidoilla raiteen normaali kallistus olisi $h_{\text{norm}} = 40 \dots 80$ mm ja henkilöliikenneraidoilla $h_{\text{norm}} = 80 \dots 110$ mm. Taulukossa 6.1 on esitetty tavoitenopeuksien mukaiset kaarresäteiden vaihtelualueet ja eri mitoitusnopeuksien mukaiset pienimmät sallitut kaarresäteet (tällöin on käytettävä sepeliradoilla 150 mm kallistusta ja $0,65 \text{ m/s}^2$ poikittaiskiihtyvyyttä sekä soraradoilla 120 mm kallistusta ja $0,45 \text{ m/s}^2$ poikittaiskiihtyvyyttä). /25/

Taulukko 6.1 Kaarresäteet eri nopeusalueilla. /25/

Nopeus (km/h)	50	80	100	120	140	160	180	200	220	250
Tavoitenopeuden mukainen suositeltava kaarresäteen vaihteluväli (m)	300 – 600	500 – 1200	800 – 2000	1100 – 3000	1500 – 4000	1900 – 5000	2400 – 6000	3000 – 7000	3500 – 8000	4500 – 9500
Mitoitusnopeuden mukainen kaarresäteen minimiarvo (m)										
Soraraiteet		314	491	708	963	1258	1592	1966	2378	3071
Sepeliraiteet		416	650							

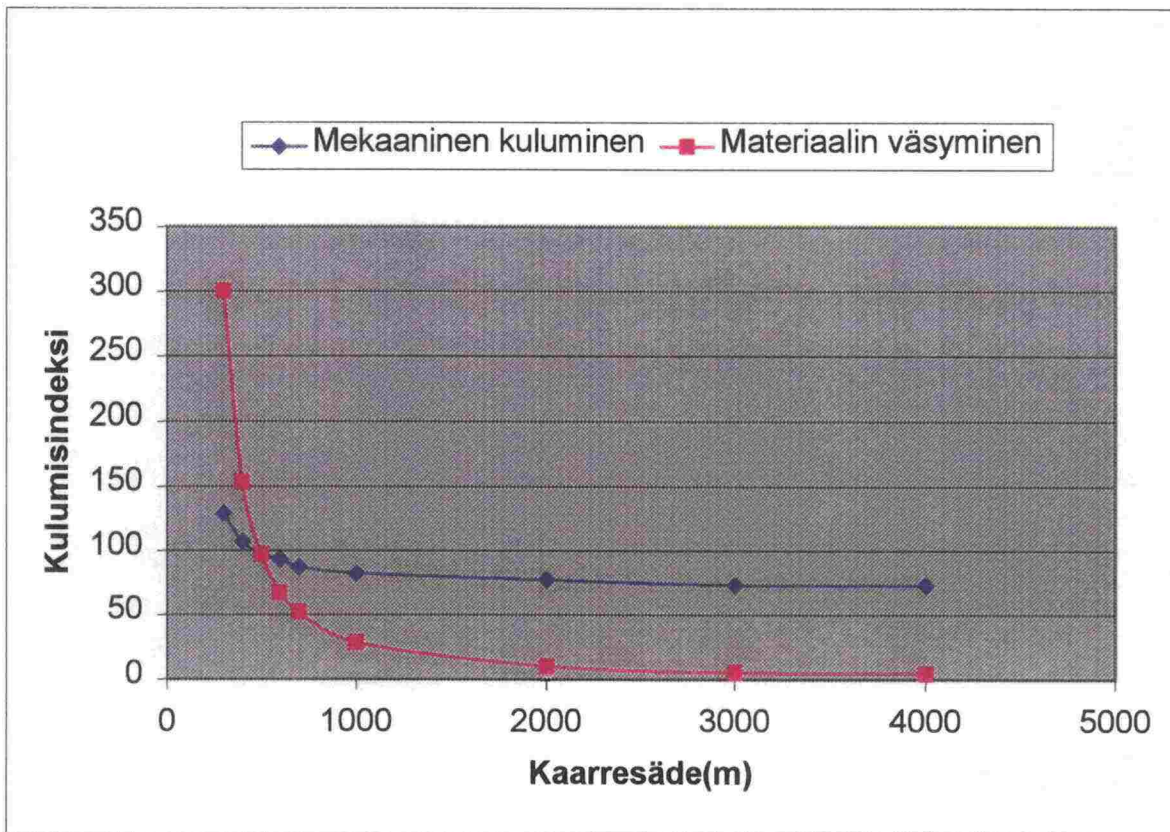
6.2 Kaarresäteen vaikutus raiteen kulumiseen

Ruotsalaisissa tutkimuksissa on todettu kaarresäteen olevan yhdessä kitkan kanssa yksi tärkeimmistä muuttujista, jotka vaikuttavat eniten kiskon kulumiseen. Mittauksissa raide kului kaarteessa, jonka säde $R = 300$ m, noin neljä kertaa niin paljon kuin kaarteessa, jonka säde $R = 600$ m. Kuvissa 6.1 ja 6.2 ilmenee kaarresäteen merkitys

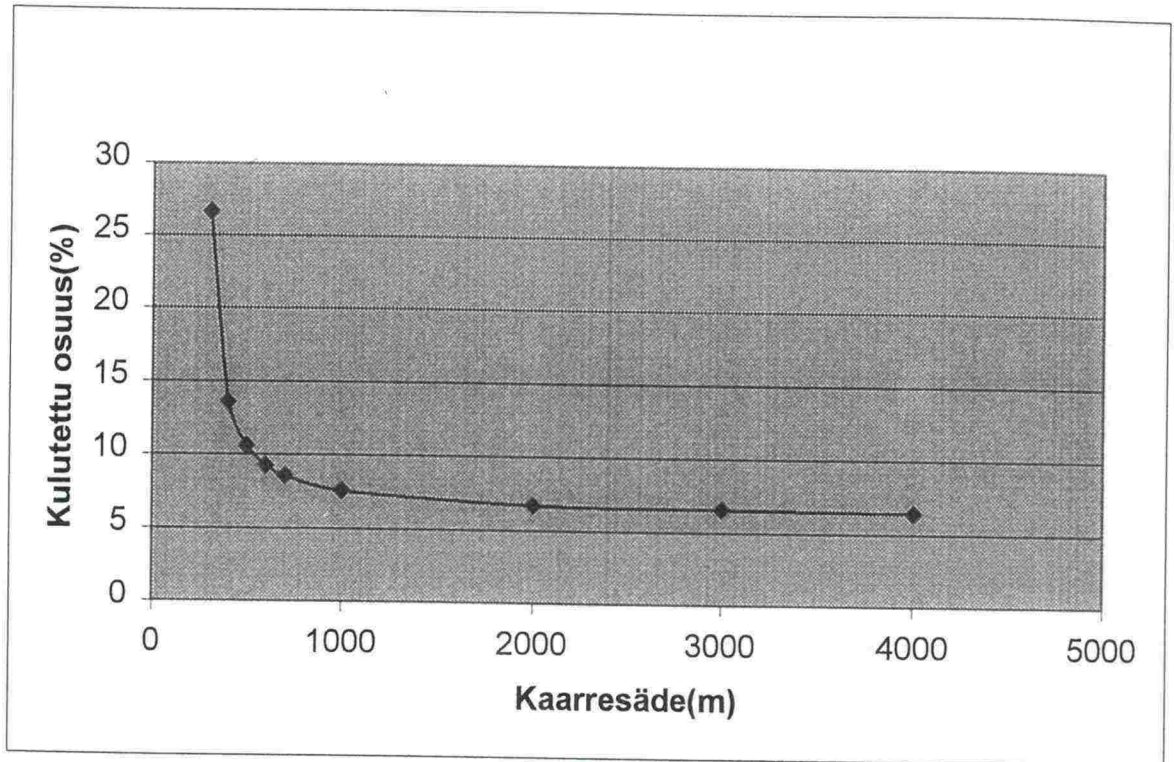
raiteen kulumiseen kahdella eri mittaustavalla. Kuvista ilmenee selvästi, että kaarresäteen ollessa niinkin alhainen kuin 300 m raiteen kulumisnopeus kiihtyy selvästi. /18/

Suomessa kaarteet, joiden säde on niinkin alhainen kuin 300 m, ovat erittäin harvinaisia radoilla, joilla uusi korotettu 250 kN:n akselipaino otettaisiin käyttöön. Tällaisia kaarteita on lähinnä vaihteissa ja ratapihoilla.

Valtion rataverkon ratapituudesta on alle 500 m säteisiä kaarteita noin 2 %, yli 500 m säteisiä kaarteita noin 30 % ja suoraa noin 67 %. /31/



Kuva 6.1 Kaksi osatekijää. Raiteen vuotuinen huononeminen kaarteissa ilmaistuna kulumisindeksinä. /14/



Kuva 6.2 Esimerkki raiteen vuotuisesta kulumisesta kaarteissa mitattuna prosenteissa (%) raiteen eliniästä. /14/

Kaarteissa raide, ja siitä etenkin kisko, kuluu enemmän kuin suoralla osuudella akselipainosta riippumatta. Suuremmilla akselipainoilla kuluminen korostuu. Kiskoista puhuttaessa tämä asia tuli esiin kaikkien paitsi yhden haastattelun asiantuntijan kohdalla, vaikka kaarretta ei edes erikseen mainittu kysymyksissä. Se, miten paljon kaarre ja kaarresäde tarkalleen vaikuttavat kunnossapitokustannuksiin, ei tämän tutkimuksen puitteissa pystytä vastaamaan. Siksi kaarteiden osuus tässä tutkimuksessa sisältyy muihin osa-alueisiin, kuten tukikerros, pölkyt ja kiinnittimet sekä kiskot. /23, 28, 30, 32, 33, 38/

6.3 Kiskojen kulumisen vähentäminen kaarteissa

Tämän tutkimuksen erään haastattelun yhteydessä tuli esiin yksi mahdollisuus, jolla kaarteissa olevien kiskojen kulumista pystyttäisiin ehkäisemään. Menetelmä ei sinänsä liity juuri korotettuihin akselipainoihin, mutta toiminee myös niiden yhteydessä.

Menetelmän syntyideana oli löytää vaihtoehto kaarteissa olevien kiskojen höyläämiselle, koska höyläämisen myötä kiskon elinikä laskee huomattavasti, vaikka höyläämiseen johtanut vika saadaankin poistettua. Menetelmän periaatteena on kiskojen kallistaminen niin, että kaarteissa sisäkiskoa kallistetaan sisäänpäin ja ulkokiskoa kallistetaan ulospäin.

Menetelmällä saadaan muutettua junan pyörien kosketuskohtaa kiskon suhteen. Kulkujälki muuttuu niin, että sisäkiskolla kulkujälki siirtyy pyörän pienelle kehälle ja ulkokiskolla pyörän isolle kehälle lähelle laippaa. Tällöin ulkopyörä kulkee noin 3 mm

pidemmän matkan pyörähdystä kohden. Tässä tapauksessa kiskojen kallistaminen siis toimii tasauspyörästä tavoin ja pyörien hankaus kiskoon vähentyy. /32/

Kyseistä menetelmää on kokeiltu hyvällä menestyksellä Pohjanmaalla. Kokeilussa mukana olevat kaarteet sijaitsevat seuraavilla rata-osuuksilla:

- Seinäjoki – Kokkola, lähellä Pännäistä, paikan nimi on Katterön kaari ja sijainti on km 519+ 850 – 520+300. Kaarresäde on 1500 m, kaarteiden pituus on 300 m, josta kallistettua on 200 m ja kallistamatonta 100 m. Kiskojen kallistus on 2,8 mm. Nopeusrajoitus on 140 km/h ja radalla liikkuu myös 245 kN:n akselipainoisia vaunuja.
- Kokkola – Ylivieska, Matkannevan kaari Kannuksessa, hieman edellistä vilkkaampi osuus, lisänä malmijunia. Sijainti on km 562+450 – 562+850. Kaarresäde on 1400 m, kaarteiden pituus on 200 m josta kallistettua on 150 m ja kallistamatonta 50 m. Kiskojen kallistus on 3,2 mm, nopeusrajoitus 140 km/h.
- Kokkola – Ylivieska, Kälviän kohdalla. Sijainti on km 568+800 – 569+150. Kaarresäde on 550 m, itse raidetta on kallistettu 125 mm ja kiskoja 3,2 mm. Nopeusrajoitus on 110 km/h.

Nämä koe-osuudet on rakennettu keväällä 1991; radalla on puupölkky ja 54 E 1-kisko Hey-Back kiinnityksillä. Kiskojen kallistus on toteutettu muovisilla välilevyillä. Radan vuotuinen liikennemäärä on noin 10 milj.brt. Näissä erikoisrakenteisissa kaarteissa on selvästi havaittavissa menetelmän hyödyt, sivukuluminen on kallistettujen kiskojen osalta selvästi vähäisempää kuin kallistamattomilla kiskoilla. Ero on niin selvä, että sen havaitsee helposti silmälläkin. Kallistetut kiskot ovat säilyttäneet ominaisuutensa ja toimintakuntonsa erittäin hyvin. /30/

Epäsymmetrisyys voidaan tehdä kaarrekiskoihin myös hiontajunalla. Tällainen on tehty kokeeksi Jyväskylän länsipäähän vuonna 1998. Menetelmää koskevat samat haitat kuin höyläystäkin.

Kaikissa pyörän ja kiskon kosketuskohtien siirroissa on vaarana, että kosketuspiste muuttuu liian pieneksi tai liian usein samaan kohtaan. Molemmissa tapauksissa vaarana on teräksen ennen aikainen väsyminen. Se näkyy kulkupinnan suomuiluna (englanniksi head-checks) ja pahimmassa tapauksessa lohkeiluna.

7. TARKASTUKSET

7.1 Pää- ja sivuraiteiden tarkastukset

Pää- ja sivuraiteiden tarkastustarve sekä tarkastusmenetelmät määräytyvät sen mukaan, mille kunnossapitotasolle rata on sijoitettu. Pääratojen kunnossapitotasot määritellään Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt) -julkaisussa. Taulukossa 7.1 esitetään pääraiteiden kunnossapitotasojen mukaiset tarkastukset. Sivuradoilla ja -raiteilla kunnossapitotaso määräytyy kohtien 7.2.1...7.2.8 mukaan. Ratalaitteet ja -rakenteet tarkastetaan säännöllisin väliajoin. Väistöraiteet tarkastetaan kunnossapitotasonsa mukaisesti. Yksittäinen rataosa voidaan kuitenkin nopeuden alentamisen tai liikenteen laadun perusteella sijoittaa toisinkin. /24/

Taulukko 7.1 Pääraiteiden kunnossapitotasojen mukaiset tarkastukset./24/

Kp-taso	Tarkastus- vaunulla (kertaa/v)	Kiihtyvyys- mittaus (kertaa/v)	Liikkuvalla kalustolla (kertaa/v)	Vaihte- tarkastus (kertaa/v)	Kävely- tarkastus (kertaa/v)
1AA	6	X	≥ 6	4	3
1A	6	X	≥ 6	4	2-3
1	3	-	≥ 6	4	1-2
2	2	-	≥ 6	2-4	1-2
3	2	-	≥ 6	2-4	1-2
4	2	-	≥ 4	2-4	1-2
5	2	-	≥ 2	1	1-2
6	2	-	≥ 2	1	1-2

X = RHK:n erillismääräyksestä.

Tarkastuskohteet ja -menetelmät vaihtelevat eri kunnossapitotasoilla. Samalla kunnossapitotasollakin saattaa esiintyä eroja tarkastuksen yksityiskohtaisessa toteuttamisessa. Kunnossapitäjä laatii tarkastussuunnitelman alueensa radoista. Tarkastussuunnitelman ajanmukaisuus on todettava vuosittain tai tarvittaessa useammin, jos tarkastettavalla alueella on suoritettu muutostöitä. Tarkastuksen lähtökohtana on turvallisuuden vaatimusten ohella huolto- ja kunnossapitotarve. Radan tarkastuksen tulee antaa radanpidolle lähtötietoja ja varmistaa, että tarvittavat työt käynnistetään riittävän aikaisin ja taloudellisesti oikeaan aikaan. Tarkastuksen tehtävänä on myös vaurioiden ennaltaehkäisy ja palautteen antaminen suunnittelu- ja työvirheiden välttämiseksi. /24/

7.2 Kunnossapitotasot

7.2.1 Kunnossapitotaso 1AA

Käsittää radat, joiden mitoitusnopeus on yli 160 km/h normaalikalustolle. Päälysrakente ne vähintään: 60 E 1 -kiskot, betoniratapölkkyt ja raidesepeli.

1. Mitataan tarkastusvaunulla kuusi kertaa vuodessa siten, että pisin kahden mittauksen väli on korkeintaan kolme kuukautta.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta vähintään kuusi kertaa vuodessa niin, että tarkastukset ovat mahdollisimman hyvin tarkastusvaunuajojen puolivälissä.
3. Radan kävelytarkastus kolme kertaa vuodessa, kuitenkin niin, että pisin kahden tarkastuksen väli on korkeintaan viisi kuukautta.
4. Vaihdetarkastus neljä kertaa vuodessa.
5. Kiihtyvyyssmittaus Ratahallintokeskuksen erillismääräyksestä. /24/

7.2.2 Kunnossapitotaso 1A

Taulukossa 7.2 on esitetty kunnossapitotason 1A päälysrakenteeseen ja maksiminopeuteen liittyvät perusteet.

Taulukko 7.2 Kunnossapitotason 1A perusteet. /24/

Nopeus (km/h)	Kiskopaino vähintään (kg/m)	Ratapölkkyt	Akselipaino (t)
140<V≤160	54 E 1	betoni/ puu	≤22,5
160<V≤ 180	54 E 1	B85 tai vanhempi	≤ 17
160<V≤ 200	54 E 1	B86 tai uudempi	≤ 17
>200	60 E 1	betoni	≤ 17

1. Mitataan tarkastusvaunulla kuusi kertaa vuodessa siten, että pisin kahden mittauksen väli on korkeintaan kolme kuukautta.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta vähintään kuusi kertaa vuodessa niin, että tarkastukset ovat mahdollisimman hyvin tarkastusvaunuajojen puolivälissä.
3. Radan kävelytarkastus vähintään kaksi kertaa, tarvittaessa kolme kertaa, vuodessa, kuitenkin niin, että pisin kahden tarkastuksen väli on korkeintaan kuusi kuukautta.

4. Vaihteiden tarkastus neljä kertaa vuodessa.
5. Kiihtyvyyssmittaus Ratahallintokeskuksen erillismääräyksestä. /24/

7.2.3 Kunnossapitotaso 1

Käsittää radat, joiden $120 < V \leq 140$ km/h. Päälysrakenne vähintään: 54 E 1 -kiskot, raidesepeli.

1. Mitataan tarkastusvaunulla kolme kertaa vuodessa.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta vähintään kuusi kertaa vuodessa niin, että tarkastukset ovat mahdollisimman hyvin tarkastusvaunuajojen puolivälissä.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Sähköistetyillä rataosilla on erikseen siitä sovittaessa oltava mukana sähköalan asiantuntija. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus neljä kertaa vuodessa. /24/

7.2.4 Kunnossapitotaso 2

Käsittää radat, joiden $V \leq 120$ km/h. Päälysrakenne vähintään: 54 E 1 -kiskot, raidesepeli.

1. Mitataan tarkastusvaunulla kaksi kertaa vuodessa.
2. Tarkastus liikkuvasta kalustosta vähintään kerran kahdessa kuukaudessa.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus kahdesta neljään kertaan vuodessa. /24/

7.2.5 Kunnossapitotaso 3

Käsittää radat, joiden $V \leq 110$ km/h. Päälysrakenne vähintään: K43-kiskot, raidesepeli.

1. Mitataan tarkastusvaunulla kaksi kertaa vuodessa.
2. Tarkastus liikkuvasta kalustosta vähintään kerran kahdessa kuukaudessa.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus kahdesta neljään kertaan vuodessa. /24/

7.2.6 Kunnossapitotaso 4

Käsittää pää- ja sivuraiteet sekä puolenvaihtopaikat, joiden $70 < V \leq 100$ km/h. Päälysrakenne vähintään: K43-kiskot, raidesora tai vastaava.

1. Mitataan pääraiteet tarkastusvaunulla kaksi kertaa vuodessa. Mitataan sivuraiteet ja puolenvaihtopaikat tarkastusvaunulla kerran vuodessa.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta vähintään kolme kertaa vuodessa. Pääraiteilla yhden tarkastuksista on tapahduttava kuuden kuukauden välein veturin ohjaamosta.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus kahdesta neljään kertaan vuodessa. /24/

7.2.7 Kunnossapitotaso 5

Käsittää pää- ja sivuraiteet, joiden $50 < V \leq 70$ km/h. Päälysrakenne vähintään: K30-kiskot, raidesora tai vastaava.

1. Mitataan pääraiteet tarkastusvaunulla kaksi kertaa vuodessa ja sivuraiteet kerran kolmessa vuodessa.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta tarpeen mukaan. Pääraiteilla yhden tarkastuksista on tapahduttava kuuden kuukauden välein veturin ohjaamosta. Sivuraiteet tarkastetaan mittausresiinalla tai vastaavalla kerran vuodessa.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus kerran vuodessa. /24/

7.2.8 Kunnossapitotaso 6

Käsittää pää- ja sivuraiteet sekä kuormaus- ja seisontaraiteet, joiden $V \leq 50$ km/h. Päälysrakenne vähintään: K30-kiskot, raidesora tai vastaava.

1. Mitataan pääraiteet tarkastusvaunulla kaksi kertaa vuodessa ja sivuraiteet kerran kolmessa vuodessa.
2. Tarkastaminen liikkuvasta kalustosta tarpeen mukaan. Pääraiteilla yhden tarkastuksista on tapahduttava kuuden kuukauden välein veturin ohjaamosta. Sivuraiteet tarkastetaan mittausresiinalla tai vastaavalla kerran vuodessa.
3. Radan kävelytarkastus keväällä. Kävelytarkastus uusitaan syksyllä tarpeellisessa laajuudessaan.
4. Vaihteiden tarkastus kerran vuodessa. /24/

7.3 Radan tarkastusmenetelmät

7.3.1 Yleistä

Radan tarkastusmenetelmät jaetaan tarkastusmittauksiin ja tarkastuskatselmuksiin. Tarkastusmittauksia ovat:

- tarkastusvaunumittaus
- kiihtyvyyssmittaus
- aukean tilan ulottuman (ATU) mittaus
- kiskon kulkupinnan mittaus
- jatkosrakojen tarkastusmittaus
- kiskojen ultraäänitarkastus
- vaihteiden tarkastus
- raiteen aseman tarkastus
- ratajohdon tarkastus /17/

Tarkastuskatselmuksia ovat:

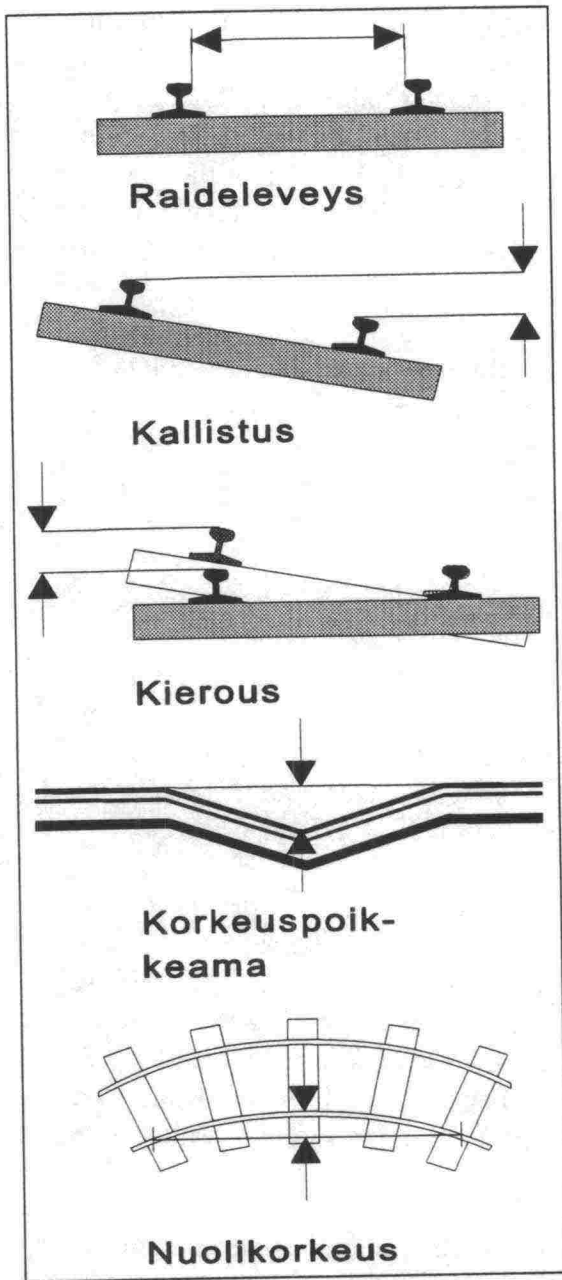
- radan kävelytarkastus,
- turvalaitetarkastus,
- siltatarkastus,
- tarkastus liikkuvasta kalustosta,
- kiskojen kuluneisuuskatselmus,
- ratakiskojen luokittelukatselmus,
- käsin mittaus,
- ratapihan tarkastus
- kunnossapitäjän tai Ratahallintokeskuksen määräämät erillistarkastukset /24/

7.3.2 Tarkastettavat suureet

Tarkastusvaunumittauksella seurataan radan geometrista kuntoa ja valvotaan, että raiteen asennolle asetetut laatuvaatimukset on täytetty.

Tarkastuksen tuloksia käytetään raiteen kunnossapidon ohjelmoinnin tarpeisiin ja rata-
töiden vastaanottotarkastuksiin.

Menetelmässä mitataan tarkastusvaunulla ratageometrisia suureita, jotka ovat nuolikorkeus, korkeuspoikkeama, kallistus, kierous ja raideleveys. Kuvassa 7.1 on esitetty ratageometristen perussuureiden periaatekuvat. Raideleveyden nimellismitta on 1524 mm. Se mitataan kiskojen kulkureunojen välistä 14 mm kiskonselän alapuolelta. Raiteen kallistuksella tarkoitetaan sisä- ja ulkokiskojen kulkupintojen välistä korkeuseroa. Kallistuksen muutosta kutsutaan kieroudeksi. Korkeuspoikkeamalla tarkoitetaan kiskon kulkupinnan teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyyttä kiskon todellisesta kulkupinnasta. Nuolikorkeudella tarkoitetaan kaaren jänteen keskipisteen etäisyyttä kaaresta. /24/



Kuva 7.1 Ratageometriset perussuureet. /24/

7.4 Päätelmiä

7.4.1 Yleistä

Käytössä olevia tarkastusmenetelmiä voidaan pitää hyvinkin kattavina ja perusteellisina. Siltä osin lisääminen tai muuttaminen ei tunnu ajankohtaiselta. On kuitenkin otettava huomioon, että kohtien 7.2.1...7.2.8 (kp-tasot), mukaan lukien taulukot 7.1 ja 7.2, mukainen jako kunnossapitotasoihin perustuu junan nopeuteen. Tässä tutkimuksessa on puolestaan kyse lähinnä akselipainosta, sen nostosta ja noston vaikutuksista. Korkeampi akselipaino ei sinänsä vaikuta radan tarkastusväleihin, vaan määräävänä on se nopeus, jolla nopeimmilla junilla halutaan liikennöidä ko. osuudella. Suomessa useimmat radat ovat sekaliikennetähtiä, joten siinä mielessä tarkastusväli muodostuu riittävän tiheäksi, kun radalla liikkuu myös nopeita henkilöjunia.

Suomessa on useita eri kiskopainoja: 30, 43, 54 ja 60 kg/m. Näistä uusille korkeammille akselipainoille sopivat 54 E 1- ja 60 E 1-kiskot. Vanhoja K30-kiskoja on vielä käytössä jonkin verran, K43-kiskoja löytyy vielä enemmänkin esim. ratapihoilta. Ratapihojen K43-kiskoilla voitaneen ajaa 250 kN:n akselipainoilla, jos nopeudet pidetään riittävän alhaisina. Niillä ei kuitenkaan tulla ajamaan matkanopeuksia korkeammilla akselipainoilla. Radoilla, joilla uusi korkeampi 250 kN:n akselipaino otetaan käyttöön, tulee olla joko 54 E 1- tai 60 E 1-kiskot. Kyseessä ovat silloin pääraiteet sekä jotkut tärkeät teollisuusraiteet. /23, 28, 30, 32, 33, 34,38/

Kunnossapitotasosta 1AA.....6 tähän tutkimukseen sisältyvät tasot 1AA, 1A, 1 ja 2, eli ne, joissa vähimmäisvaatimus kiskolle on 54 E 1 ja tukikerrokselle raidesepeli. Myös kp-taso 3 voi tulla kysymykseen niissä tapauksissa, joissa ko. rataosuudella on 54 E 1-kiskot. Muut kunnossapitotasot (4–6) eivät täytä 250 kN:n akselipainon vaatimuksia radan rakenteelle. /23, 28, 30, 32, 33, 34, 38/

7.4.2 Ehdotuksia

Jos oletamme, että uusia raskaita 250 kN:n akselipainoja käytetään radoilla, joiden kunnossapitotaso on 1AA, 1A, 1, 2 ja mahdollisesti 3, voimme todeta vaatimuksen tukikerrosmateriaalin osalta yhteneväksi, eli mainitut tasot vaativat raidesepelin. Kiskoja ja pölkkyjä osalta kp-taso 1AA eli korkein taso vaatii 60 E 1-kiskot ja betonipölkkyt. Muihin alempiin tasoihin kelpaavat myös puupölkkyt ja 54 E 1-kiskot.

Kun tarkastelee raskaita akselipainoja, radan rakennetta ja ohjeiden mukaisia tarkastusvälejä yhdessä, huomaa, miten koko tarkastusjärjestelmä on luotu nopeuden ehdoilla. Tämä on tietenkin siinä mielessä luontevaa, että mitä suurempi nopeus sen parempi on radan tason oltava junaturvallisuuden kannalta. Kun uusilla, suuremmilla akselipainoilla (250 kN) ajetaan sekaliikenne radoilla, joilla on myös nopeita henkilöjunia, määräytyvät radan tarkastukset näiden henkilöjunien nopeuden perusteella. Tällöin tarkastuksia on tarpeeksi usein myös uusia korkeampia akselipainoja ajatellen, joiden vaikutuksia ainakin aluksi tulisi tutkia tarkkaan. /30, 33, 34/

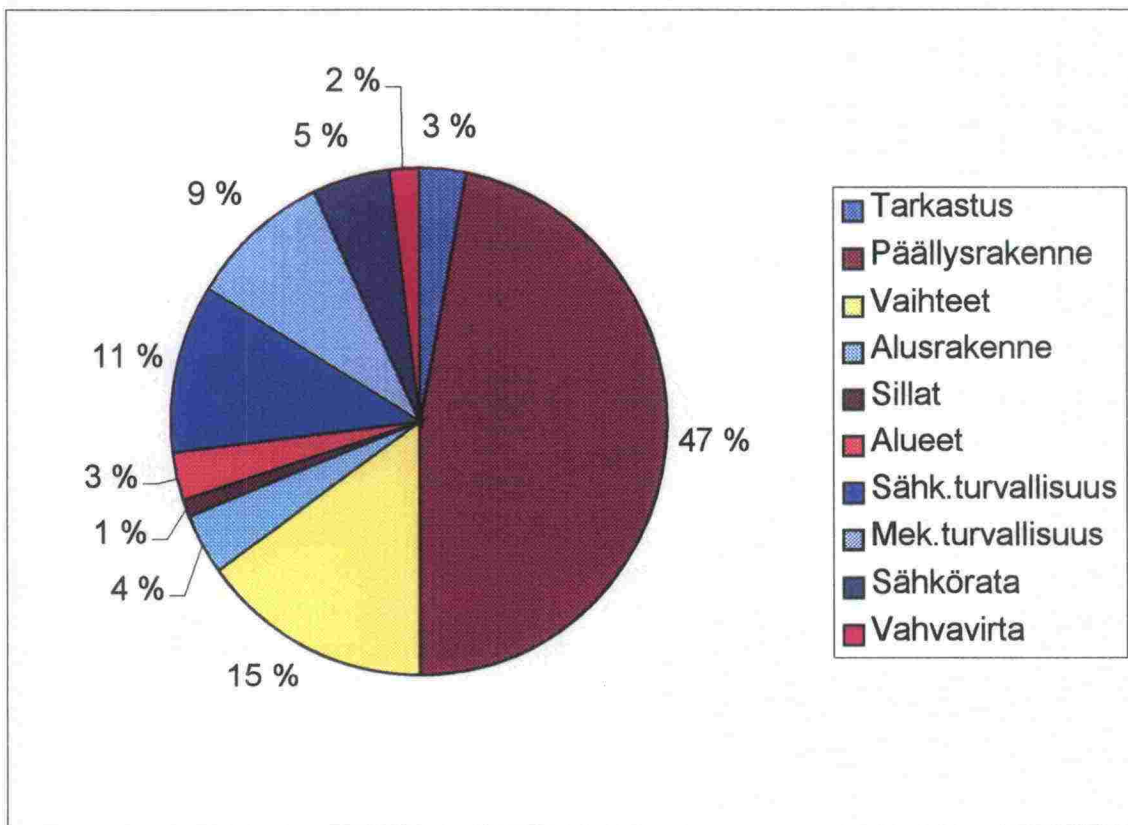
Eräänlaisiksi väliinputoajiksi voivat joutua radat, joilla tullaan ajamaan uusilla korkeammilla akselipainoilla (250 kN), mutta joilla ei ole henkilöliikennettä. Näiden ratojen mitoitusnopeus on sen vuoksi alhaisempi ja tällöin niiden kp-taso voi olla esim. 2 tai 3. Tarkastusvälit eri menetelmillä tulevat olemaan selvästi pitempiä (taulukko 7.1) kuin korkeampiluokkaisten ratojen. Voidaan yksinkertaisesti todeta, että korkeampi-luokkainen rata (60 E 1, betonipölkkyt), johon korkeammat akselipainot vaikuttavat vähemmän kuluttavasti, tarkastetaan useammin kuin alempiluokkainen rata (54 E 1, puupölkkyt). Korkeammat akselipainot aiheuttavat kuitenkin suurempia vaurioita juuri jälkimmäiseen rataan.

Kun 250 kN:n akselipainot otetaan käyttöön, radan tarkastuksia voitaisiin katsoa hieman toisestakin näkökulmasta. Jos rataosuudelle tulee raskasta 250 kN:n liikennettä, kannattaisi käytettävää tarkastusväliä miettiä tapauskohtaisesti. Pitäydytäänkö puhtaasti nopeuteen perustuvassa järjestelmässä (kohdat 7.2.1....7.2.8.), vai otetaanko myös akselipainot huomioon? Ainakin aluksi tilannetta tulisi seurata erittäin tarkasti jonkin pituisen siirtymäkauden ajan. Vanhempia puupölkkyjä kiskon kiinnityksineen tulisi tarkkailla erityisen huolella. /34/

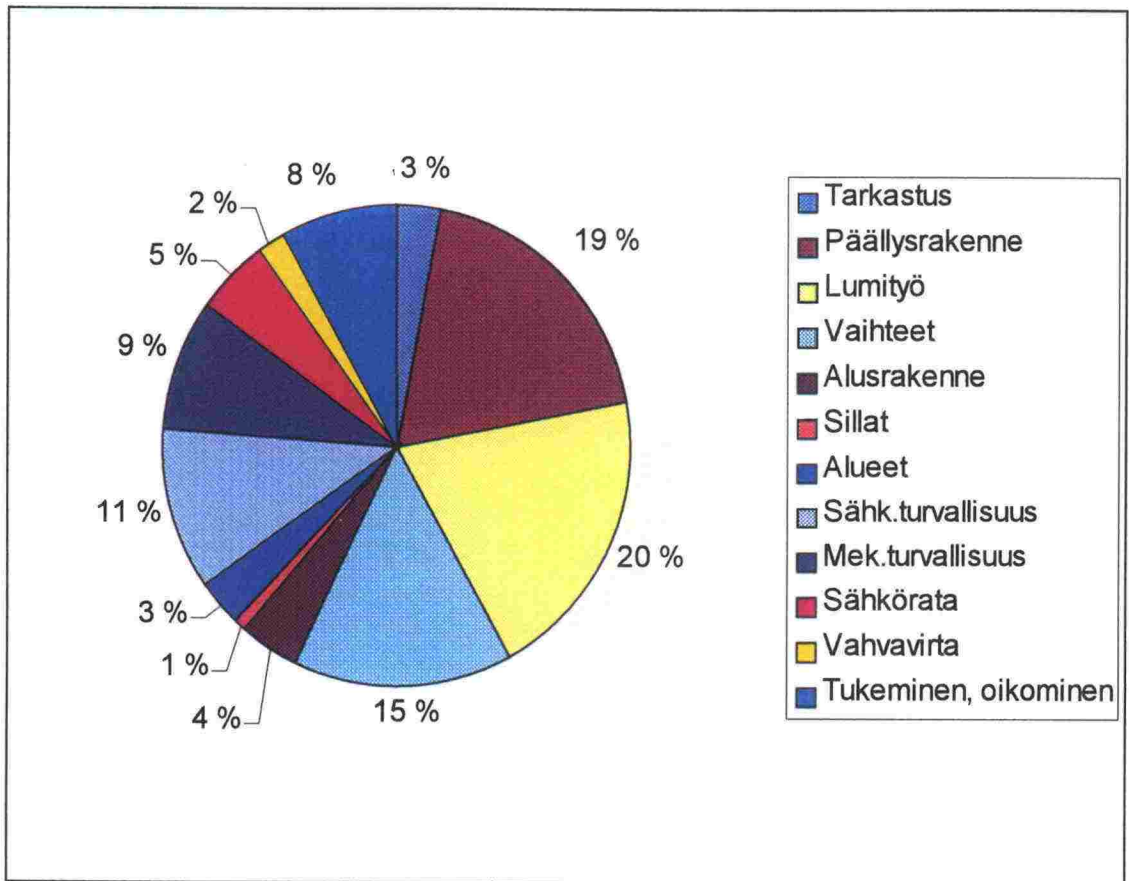
8. LASKELMAT

8.1 Oy VR-Rata Ab:n kunnossapitokustannukset

Kuvassa 8.1 on Oy VR-Rata Ab:n kunnossapitokustannusten jakautuma koko rataverkon osalta vuosina 1998-1999. Päälyysrakenteen kunnossapitokustannusten huomataan olevan peräti 47 % kaikista kunnossapitokustannuksista. Oy VR-Rata Ab luokittelee kuitenkin myös lumitöistä aiheutuvat kustannukset mukaan päälyysrakenteen kustannuksiin. Jos lumityöt erotellaan omaksi osakseen, saadaan hieman erilainen kuva kustannuksista. Lisäksi tiedetään, että radan tukeminen ja oikominen edustavat yhteensä 8 %:a päälyysrakenteen 47 %:n osuudesta. Kuva 8.2.



Kuva 8.1 Oy VR-Rata Ab:n kunnossapitokustannusten jakautuma vuosina 1998-1999.
/35/



Kuva 8.2 Oy VR-Rata Ab:n kunnossapitokustannusten jakautuma vuosina 1998-1999, lumityöt eroteltuna omaksi osakseen. /35/

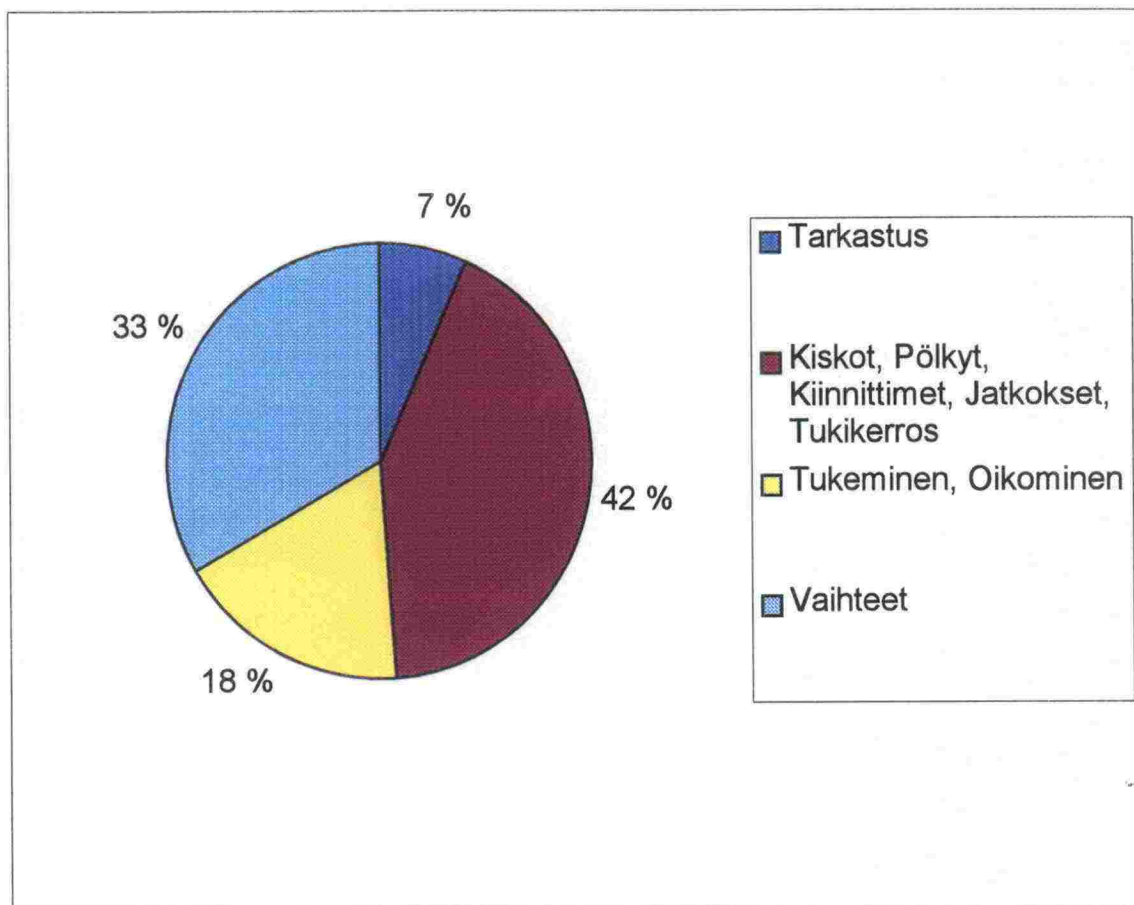
Kuvasta 8.2 nähdään, että lumityöt edustavat peräti 20 % kunnossapitokustannuksista. Otanta on kuitenkin pieni eli vain kahden talven keskiarvo, joten pitkällä aikavälillä osuus voisi olla toisenlainen. Ulkomaisissa tiedoissa kunnossapitokustannusten jakautumisesta ei ole puhuttu sanaakaan lumitöistä. Keskieuropalaisessa tutkimuksessa (ORE/ERRI) tämä on erilaisesta ilmastosta johtuen luonnollista, mutta lumesta ei ole puhuttu myöskään ruotsalaisten malmirataa (Malmbanan) koskevissa tiedoissa. Tuo rata sijaitsee kuitenkin Ruotsin pohjoisosassa kutakuinkin samalla korkeudella kuin Kemi-Rovaniemi Suomessa eli pohjoisempana kuin valtaosa Suomen rataverkosta.

Jos kuvan 8.2 tiedoista otetaan käyttöön ne, joihin tässä tutkimuksessa keskitytään eli suoraan liikenteestä johtuvat kunnossapitokustannukset, saadaan taas aivan uudenlainen kuva. Kuvan 8.2 osa-alueista liikenteestä riippuvaisia ja lisäksi tähän tutkimukseen sisältyviä ovat:

- Päälysrakenne (19 %)
- Vaihteet (15 %)
- Tukeminen, oikominen (8 %)
- Tarkastukset (3 %)

Yhteensä nuo ovat siis 45 % kaikista kunnossapitokustannuksista. Päälysrakenne sisältää kiskot, pölkyt, kiinnittimet, jatkokset sekä tukikerroksen. Näiden tietojen perusteella saadaan uusi kuva, johon on otettu mukaan vain liikenteestä johtuvat

kustannukset, kertomalla ne luvulla $100/45 = 2,222$. Markkamääräisiä lukuja ei ollut saatavilla. Kuva 8.3.



Kuva 8.3 Oy VR-Rata Ab:n liikenteestä riippuvaisten kunnossapitokustannusten jakautuma vuosina 1998-1999.

8.2 Eurooppalainen tutkimus

Euroopassa (ORE) tehtiin v. 1987 tutkimus, jossa tutkittiin akselipainon noston 200 kN:sta 225 kN:iin vaikutuksia rataa ja radan kunnossapitokustannuksiin. Koetta varten rakennettiin ympyränmuotoinen koerata Velimiin silloiseen Tšekkoslovakiaan. Mittaukset tehtiin osittain tällä koeradalla ja osittain usealla valitulla eurooppalaisella rataosuudella. Kokeessa käytetyssä junassa oli 4 Remms-koevaunua. Kahdessa akselipaino oli 200 kN ja kahdessa muussa 225 kN. Jokainen vaunu oli varustettu LHB 82 teleillä (akselit liikkuvat pitkittäissuunnassa) sekä Y 25 teleillä (akselit eivät liiku pitkittäissuunnassa). /21/

Velimin koeradana raiteessa oli kahta erilaista rakennetta, jotta tilannetta voitaisiin verrata normaalitilanteeseen. Tyypiltään ”keskimääräinen rakenne” sisälsi puupölkyt ja S 49 kiskot (50 kg/m), ”raskaassa rakenteessa” oli betonipölkyt ja R 65 kisko (65 kg/m). Molemmissa tapauksissa kyseessä oli jatkuvakiskoraide. Mittaukset tehtiin kolmella eri nopeudella: 60, 100 ja 120 km/h myös normaalitilannetta kuvaten. /21/

Taulukon 8.1 esimerkkilaskun mukaan kunnossapitokustannusten nousu olisi n. 15 %, kun pelkästään 200 kN:n akseleista muodostuva liikenne muuttuu kokonaan 225 kN:n akseleista muodostuvaksi. Taulukossa esiintyvät kertoimet on laskettu kaikkien erilaisten ominaisuuksien kuten radan tyyppi, nopeus, akselipaino jne. yhdistelmien perusteella. Ne siis edustavat keskimääräisiä koetuloksia ja laskelmia. /21/

Taulukko 8.1 Radan kunnossapitokustannusten vertailu 200 kN:n ja 225 kN:n akselipainojen välillä. /21/

Asetelma	Radan geo- metria	Kiskon väsytys- vauriot	Kiskon pinta- vauriot	Muut tekijät	Liiken- teestä riippu- mattomat kustann.	Kustan- nukset yhteensä
*) Oletettu kustannusjako 200 kN:n akseleilla	10	15	15	30	30	100 %
Kerroin	1,368	1,110	1,441	1,110	1,000	-
Uudet kustannukset 225 kN:n akseleilla	13,7	16,6	21,6	33,3	30	115,2 %

*) Nämä arvot vaihtelevat eri radoilla ja hallinnoilla.

Taulukon 8.1 tilanne ei kuitenkaan ole realistinen, koska joukossa on aina merkittävä osa alle 200 kN:n akselipainoisia aksleita. Lisäksi on epätodennäköistä, että kaikki 200 kN:n akselit kasvaisivat 225 kN:iin. Tämän johdosta tehtiin myös laskelmia eri akselipainoyhdistelmillä, joilla pyrittiin simuloimaan todellista tilannetta paremmin. Nämä esimerkit löytyvät taulukosta 8.2. Sekaliikennerradoilla tällaiset liikenneasetelmat ovat hyvinkin tavallisia. /21/

Taulukko 8.2 Eri akselipainoyhdistelmien vaikutukset radan kunnossapitokustannuksiin. /21/

Asetelma (oletukset)	50 kN:n akseli- painon osuus (%)	150 kN:n akseli- painon osuus (%)	200 kN:n akseli- painon osuus (%)	225 kN:n akseli- painon osuus (%)	Kunnossa- pito kustan- nusten lisäys (%)
Lähtötilanne	30	20	50	0	0
Oletus 1	30	20	40	10	2
Oletus 2	30	20	30	20	5
Oletus 3	30	20	20	30	7
Oletus 4	30	20	10	40	10

Toisessa tilanteessa tarkasteltiin kunnossapitokustannusten nousua, kun liikenne muodostuu pelkistä 200 kN:n ja 225 kN:n akseleista. Kun 225 kN:n akseleiden määrä on enemmän todellisuutta vastaava, kustannusten nousukin on selvästi alhaisempi kuin 15 %, taulukko 8.3. Kiinnostavaa on se, että kunnossapitokustannusten nousu on suoraan verrannollinen niiden akseleiden määrään, joiden paino nousee 200 kN:sta 225 kN:iin. /21/

Taulukko 8.3 Akselipainon noston 200 kN:sta 225 kN:iin vaikutus radan kunnossapitokustannuksiin. /21/

Asetelma (odotukset)	Akselipainon 200 kN osuus (%)	Akselipainon 225 kN osuus (%)	Kunnossapito- kustannusten lisäys (%)
Lähtötilanne	100	0	0
Oletus 1	80	20	3
Oletus 2	60	40	6
Oletus 3	40	60	9
Oletus 4	20	80	12
Oletus 5	0	100	15

Jotta taulukoiden 8.1-8.3 arvot olisivat käyttökelpoisia tässä tutkimuksessa, ne tulee muokata vastaamaan tämän tutkimuksen asetelmaa. Taulukot 8.2 ja 8.3 ovat vain esimerkkejä erilaisista kuormitustilanteista, mutta taulukon 8.1 arvoja voidaan hyödyntää muokkaamalla ne haluttuun muotoon. Ensinnäkin arvot tulee kertoa luvulla $(250/225-1)/(225/200-1) = 0,89$. Lisäksi taulukosta poistetaan sarake "liikenteestä riippumattomat kustannukset" ja sen oletusarvo jaetaan muihin sarakkeisiin niiden keskinäisen suuruuden suhteessa. Tuloksena saadaan taulukko 8.4.

Taulukko 8.4 Radan liikenteestä riippuvien kunnossapitokustannusten vertailu 225 kN:n ja 250 kN:n akselipainojen välillä.

Asetelma	Radan geo- metria	Kiskon väsymis- vauriot	Kiskon pinta- vauriot	Muut tekijät	Kustan- nukset yhteensä
*) Oletettu kustannusjako 225 kN:n akseleilla	14,3	21,4	21,4	42,9	100 %
Kerroin	1,216	1,000	1,281	1,000	—
Uudet kustannukset 250 kN:n akseleilla	17,4	21,4	27,4	42,9	109,1 %

Korjattujen kertoimien minimiarvona oli arvo yksi (1,00), jota myös tässä pidettiin alimpana realistisena. Kunnossapitokustannuksille saatiin taulukon 8.4 mukaan kasvuksi n. 9 % akselia kohden, kun 225 kN:n akselipaino kasvaa 250 kN:iin. Jos kokonaistonnimäärä pysyisi samana, olisi kustannusten kasvu $225/250 * 9,1 \% = 8,2 \%$.

8.3 Ruotsalaiset tutkimukset

Ruotsalaiset ovat ajaneet malmiradallaan (Malmbanan) 250 kN:n akselipainoilla kauan. He ovat seuranneet vaurioita ja kunnossapitokustannuksia tarkalla kirjanpidolla. Tämä on ollut luonnollista, koska radalla ei ole juurikaan muuta liikennettä kuin raskaat malmijunat. Tällöin vikaseuranta ja kunnossapidon kehittäminen on ollut suorassa yhteydessä muutoksiin malmijunaliikenteessä.

Taulukossa 8.5 on tämän malmiradan kunnossapitokustannusten jakautuminen eri osaluueille vuosina 1970-1995, kun suurin akselipaino oli 250 kN. Taulukon tulokset ovat sikäli hieman normaalitilanteesta poikkeavat, että käytössä on ollut erityiset malmivaunut, jotka poikkeavat telirakenteeltaan normaaleista tavaravaunuista.

Taulukko 8.5 Radan (Malmbanan) kunnossapitokustannusten jakautuminen vuosina 1970-1995. /8/

Kunnossapitotoimen laji	Osuus kustannuksista (%)
Ei liikennöintiin perustuva	48,2
Kiskojen vaihto	29,7
Kiskojen kunnossapito(eristysjatkokset, hionta, asennus jne.)	6,5
Vaihteet	7,4
Suistumisista aiheutuneet vauriot jne.	3,1
Tukikerroksen puhdistus jne.	2,5
Raide(mm. raiteen oikominen)	1,1
Tarkastus, katsastus	1,5

Taulukon kohta "kiskojen vaihto" on sellainen osa-alue, joka puuttuu suomalaisista tiedoista kokonaan. Tämä johtuu erilaisesta erittelystä. Oy VR-Rata Ab:n luokittelussa kiskojen vaihto kuuluu radan peruskunnostukseen ja siksi se ei näy kunnossapitokustannuksissa. Kun taulukko 8.5 muokataan uuteen muotoon, missä on mukana vain Oy VR-Rata Ab:n tietojen kanssa vertailukelpoiset liikenteen aiheuttamat kunnossapitokustannukset, saadaan taulukko 8.6.

Banverketin omissa tutkimuksissa on muodostettu seuraavat teesit:

- Rataosakohtaisista kunnossapitokustannuksista ovat:
 - 50% riippuvaisia liikennemäärästä, varsinkin tukikerros, pölkyt ja kiskot
 - 50% riippumattomia liikennemäärästä, esim. turvalaitteet, lumenpoisto jne.
- Liikennemäärästä riippuvaisista kunnossapitokustannuksista kiskojen osuus on suurin yksittäinen kustannusosa:
 - 25% rataosakohtaisista kustannuksista eli puolet liikennemäärästä riippuvaisista kunnossapitokustannuksista./14/

Tietoa kiskojen osuudesta kunnossapitokustannuksiin on hyödynnetty taulukossa 8.6.

Taulukko 8.6 Liikenteestä aiheutuneet kunnossapitokustannukset (Malmbanan).

Kunnossapitotoimen laji	Osuus kustannuksista (%)
Kiskojen kunnossapito(eristysjatkokset, hionta, asennus jne.)	50
Vaihteet	29,6
Tukikerroksen puhdistus jne.	10
Raide(mm. raiteen oikominen)	4,4
Tarkastus, katsastus	6

Ruotsin malmiradalla (Malmbanan) on siirrytty 250 kN:sta 300 kN:iin akselipainoon maaliskuussa 2001. Ennen siirtymistä tehtiin mittavat tutkimukset akselipainon korotuksen vaikutuksista radan rakenteisiin. Tulos ilmoitetaan kertoimena, joka kuvaa sitä, miten vaurioiden kasvunopeus/akseli- tai vaunuylitys muuttuu, kun akselipaino nousee 250 kN:sta 300 kN:iin. Vertailussa käytetyt akselityypit ovat 250 kN:n osalta vanhanmalliset telit (uusimmatkin vaunut 70-luvun alusta) ja 300 kN:n osalta taas uudenmallisella ohjaavalla telillä varustetut. Taulukko 8.7.

Taulukko 8.7 Yhteenvedo siitä, kuinka akselipainon korotus 250 kN:sta 300 kN:iin vaikuttaa eri vauriolajien kasvunopeuteen. /3/

Radanosa	Vauriolaji	Kasvunopeuden (v_{300}/v_{250}) muutoskerroin akseliylitystä kohden		
		Minimi kerroin	Odotettu kerroin	Maksimi kerroin
Kisko	Pinnan väsyminen	1,0	1,5	2,0
	Sivukuluminen kaarteissa	0,75	1,0	1,2
	Sisäinen väsyminen, hamara	2,0	3,0	4,0
	Sisäinen väsyminen, jalka	1,0	1,2	2,0
	Kiskon katkeaminen lovipyörien vuoksi	1,1	1,3	2,2
	Lovipyörien muita vaikutuksia	1,0	1,1	1,2
	Aallonmuodostus	1,0	1,1	1,2
	Pintaviat	1,1	1,2	1,3
Terminthitsit	Sisäinen väsyminen	1,2	1,4	1,5
Eristysjatkot	Muodonmuutos	1,1	1,1	1,2
Pölkyt	Väsyminen jne.	1,0	1,05	1,1
Kiinnitykset	Väsyminen	1,0	1,05	1,1
Vaihde, risteys	Muodonmuutos, Valssaantuminen	1,1	1,1	1,2
Vaihde, kieli	Sivukuluminen	0,75	1,0	1,2
Vaihde, välikisko	Sivukuluminen	0,75	1,0	1,2
Vaihde, tukikisko	Ylivalssaantuminen, murtumat	1,1	1,1	1,2
Vaihde, muuta	Kiinnitykset, tukikerros	1,0	1,1	1,2
Tukikerros	Jauhautumisnopeus ja raiteen aseman muutokset	1,2	1,2	1,2

Taulukosta 8.7 on huomattava, että kertoimet on laskettu akselia kohden. Tämä tarkoittaa siis tässä tapauksessa myös kokonaistonnimäärän kasvattamista. Kasvu on 20 %, kun akselipaino nousee 250 kN:sta 300 kN:iin. Tulos ei ole vertailukelpoinen tämän tutkimuksen alkuasetelman kanssa, joka oli, että akselipaino nousee kokonaistonnimäärän pysyessä samana. Jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia, tulee taulukon 8.7 kertoimia pienentää kertomalla ne luvulla $250/300=0.833$. Taulukosta 8.8 löytyvät tämän tutkimuksen kanssa vertailukelpoiset arvot.

Taulukko 8.8 Yhteenveto siitä, kuinka akselipainon korotus 250 kN:sta 300 kN:iin vaikuttaa eri vauriolajien kasvunopeuteen. Taulukon kertoimet on korjattu vastaamaan tilannetta, jossa kokonaistonnimäärä pysyy vakiona.

Radanosa	Vauriolaji	Kasvunopeuden (v300/v250) muutoskerroin akseliylitystä kohden		
		Minimi kerroin	Odotettu kerroin	Maksimi kerroin
Kisko	Pinnan väsyminen	0,83	1,25	1,67
	Sivukuluminen kaarteessa	0,62	0,83	1,00
	Sisäinen väsyminen, hamara	1,66	2,50	3,33
	Sisäinen väsyminen, jalka	0,83	1,00	1,67
	Kiskon katkeaminen lovipyörän vuoksi	0,92	1,08	1,83
	Lovipyörien muita vaikutuksia	0,83	0,92	1,00
	Aallonmuodostus	0,83	0,92	1,00
	Pintavauriot	0,92	1,00	1,08
		1,00	1,17	1,25
Termitiitihitsit	Sisäinen väsyminen	0,92	0,92	1,00
Eristysjatkot	Muodonmuutos	0,83	0,88	0,92
Pölkyt	Väsyminen jne.	0,83	0,88	0,92
Kiinnitykset	Väsyminen	0,92	0,92	1,00
Vaihde, risteys	Muodonmuutos, Valssaantuminen	0,62	0,83	1,00
Vaihde, kieli	Sivukuluminen	0,62	0,83	1,00
Vaihde, välikisko	Sivukuluminen	0,92	0,92	1,00
Vaihde, tukikisko	Ylivalssaantuminen, murtumat	0,83	0,92	1,00
Vaihde, muuta	Kiinnitykset, tukikerros	1,00	1,00	1,00
Tukikerros	Jauhautumisnopeus ja raiteen aseman muutokset			

Mitä taulukosta 8.8 pystyy sitten päättämään, kun akselipaino nousee 250 kN:sta 300 kN:iin eli tässä tapauksessa 20 % kokonaistonnimäärän pysyessä muuttumattomana? Kun tarkastellaan keskimmaista numerosaraketta "odotettu kerroin", voidaan todeta, että ainoat merkittävät kohdat vaurioiden lisääntymisen suhteen liittyvät kiskoon. Ne ovat tässä kiskon pinnan väsyminen (1,25), kiskon hamaran sisäinen väsyminen (2,50) sekä termitiitihitsit (1,17).

Kiskon pinnan väsymisen odotettu kerroin on 1,25 eli kasvua on 25 %. Kun akselipainon korotus on 20 %, noudattavat nämä luvut toisiaan melko hyvin. Saksalaisessa tutkimuksessa kohdassa 4.5 tämä sama yhteys todettiin hyvinkin tarkkaan kiskon kulumisen osalta. Ruotsalainen arvio toteuttaa samaa yhtälöä, jos tuo "pinnan väsyminen" voidaan tulkita samaksi kuin kiskon pystykuluminen. Oletettavasti pinnan väsyminen johtaa sen kulumiseen ja tässä taulukossa oli erikseen kohta pintavauriot, joten niistäkään ei tässä kohdassa siis voinut olla kyse.

Jotta saataisiin taulukon 8.8 perusteella kertoimet tämän tutkimuksen asettelmaan, jossa akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin, tulee arvot kertoa luvulla

$(250/225-1)/(300/250-1) = 0,56$. Näin saadaan taulukko 8.9, jonka kertoimet ovat käyttökelpoiset tässä tutkimuksessa.

Taulukko 8.9 Yhteenveto siitä, kuinka akselipainon korotus 225 kN:sta 250 kN:iin vaikuttaa eri vauriolajien kasvunopeuteen. Taulukon kertoimet kuvaavat tilannetta, jossa kokonaistonnimäärä pysyy vakiona.

Radanosa	Vauriolaji	Kasvunopeuden (v250/v225) muutoskerroin akseliylitystä kohden		
		Minimi kerroin	Odotettu kerroin	Maksimi kerroin
Kisko	Pinnan väsyminen	0,90	1,14	1,37
	Sivukuluminen kaarteessa	0,79	0,90	1,11
	Sisäinen väsyminen, hamara	1,37	1,83	2,29
	Sisäinen väsyminen, jalka	0,90	1,00	1,67
	Kiskon katkeaminen lovipyörän vuoksi	0,96	1,04	1,46
	Lovipyörien muita vaikutuksia	0,90	0,96	1,00
	Aallonmuodostus	0,90	0,96	1,00
	Pintavauriot	0,96	1,00	1,04
Terminiitihitsit	Sisäinen väsyminen	1,00	1,09	1,14
Eristysjatkot	Muodonmuutos	0,96	0,96	1,00
Pölkyt	Väsyminen jne.	0,90	0,93	0,96
Kiinnitykset	Väsyminen	0,90	0,93	0,96
Vaihde, risteys	Muodonmuutos, Valssaantumisen	0,96	0,96	1,00
Vaihde, kieli	Sivukuluminen	0,79	0,90	1,00
Vaihde, välikisko	Sivukuluminen	0,79	0,90	1,00
Vaihde, tukikisko	Ylivalssaantuminen, murtumat	0,96	0,96	1,00
Vaihde, muuta	Kiinnitykset, tukikerros	0,90	0,96	1,00
Tukikerros	Jauhautumisnopeus ja raiteen aseman muutokset	1,00	1,00	1,00

Taulukon 8.9 kertoimista voidaan tehdä seuraavat päätelmät vaurioiden lisääntymisestä:

- Kiskon osalta hamaran väsyminen on arvoltaan suurin. Hamaran pettäminen johtaa kuitenkin kiskon katkeamiseen ja kiskojen vaihto (ei yksittäisen kiskon vaihto) kuuluu jo perusparannuksen piiriin. Kunnossapitoon merkittävästi vaikuttava ja tässä selvästi kasvava osa on pinnan väsyminen (kasvu 14 %). Muiden osien kohdalla kerroin on hyvin lähellä arvoa yksi. Kiskovaurioiden kasvuille merkittävimpiä on pinnan väsyminen, joka oletettavasti johtaa pinnan vaurioitumiseen ja ennen kaikkea sen kulumiseen, joten sen vuoksi tässä käytetään kiskon vaurioitumiselle sen laskennallista maksimiarvoa eli 14 %.
- Terminiitihitsien vaurioiden kasvu on 9 %.
- Eristysjatkosten muodonmuutokset vähenevät 4 %.

- Pölkkyjen ja kiinnitysten vauriot vähenevät 7 %.
- Vaihteen kuluvien osien vauriot vähenevät keskimäärin 6 %.
- Tukikerroksen vauriot eivät muutu.

Oletuksena on, että vauriot ja kunnossapitokustannukset muuttuvat samassa suhteessa.

Jos otetaan vertailuun Oy VR-Rata Ab:n (kuva 8.3) ja Banverketin/malmiradan kunnossapitokustannusten jakaantuminen (taulukko 8.6), saadaan taulukko 8.10.

Taulukko 8.10 Oy VR-Rata Ab:n ja Banverketin (Malmaban) kunnossapitokustannusten jakaantuminen osa-alueittain.

Kunnossapitotoimen laji	Oy VR-Rata Ab (%)	Banverket Malmaban (%)
Kiskojen kunnossapito(eristysjatkokset, hionta, asennus jne.)		50
Kiskot, pölkyt, kiinnittimet, jatkokset, tukikerros	42	
Vaihteet	33	29,6
Tukikerroksen puhdistus jne.		10
Tukeminen, oikominen	18	
Raide(mm. raiteen oikominen)		4,4
Tarkastus	7	6

Taulukosta nähdään heti, että vaihteiden ja tarkastusten osalta kustannukset ovat lähes samat. Muilta osin vertailu on vaikeampaa, koska varsinkin Oy VR-Rata Ab:n tiedoissa sama kustannusosa sisältää hyvinkin erilaisia radanosia.

Kohdan kiskot, pölkyt, kiinnittimet, jatkokset ja tukikerrososuus, eli 42 %, tulisi pilkkoa osiin ja kohdistaa eri radanosille. Tehtävä on kuitenkin vaikea, koska tarvittava tieto eri radanosien suhteellisista osuuksista puuttuu.

Ruotsalaistietoihin sisältyvä kiskojen osuus 50 % voidaan pilkkoa osiin taulukon 4.3 mukaan. Tällöin eristysjatkoksien osuus on $0,3 * 50 \% = 15 \%$. Taulukon 4.3 kohdan muut ja sen osuus 10 %, eli tässä tapauksessa $0,1 * 50 \% = 5 \%$, oletetaan tässä edustavan hitsejä ja niistäkin tarkennettuna termiittihitsejä, joita haastatellut asiantuntijat pitivät hitsityypeistä selvästi vaurioalteimpina akselipainoa nostettaessa. /28, 34, 38/

Muuten taulukossa 8.11 on käytetty ruotsalaistietoja sellaisenaan, koska myös tämän taulukon kertoimet on määritelty saman radan (Malmaban) tiedoista. Kohdan ”pölkyt + kiinnikkeet” luku 4,4 % on oletuksena otettu sellaisenaan taulukon 8.10 kohdasta ”raide”. Lisäksi pölkkyjen + kiinnittimien arvo pysyy muuttumattomana ja sen merkitys loppuarvoon on muutenkin vähäinen.

Tarkastuksen kustannuksiin oletettiin maltillinen 5 % kasvu, joka aiheutuu mahdollisesti lisätyistä tarkastuksista. Raskaan liikenteen vaikutuksia uudella akselipainolla (250 kN) tultaisiin aluksi seuraamaan hieman tarkemmin kuin nopeuksiin perustuvat kunnossapitotasot edellyttäisivät. Kustannus tulee oletetuista lisääntyneistä työtunneista. Kalusto ja henkilöorganisaatio Oy VR-Rata Ab:lla on jo olemassa.

Taulukko 8.11 Kunnossapitokustannusten muutos kun akselipainoa korotetaan 225 kN:sta 250 kN:iin ja kokonaistonnimäärä pysyy samana.

Radanosa	Osuus kunnossapitokustannuksista (%)	Kerroin	Uudet kunnossapitokustannukset (%)
Kiskot	30	1,14	34,2
Termiittihitsit	5	1,09	5,4
Eristysjatkokset	15	0,96	14,4
Pölkyt + Kiinnikkeet	4,4	0,93	4,1
Vaihteet	29,6	0,94	27,8
Tukikerros	10	1,00	10
Tarkastus	6	1,05	6,3
Yhteensä			102,2 %

Taulukon 8.11 mukaan kunnossapitokustannusten kasvu on 2,2 %, kun akselipaino nousee 225 kN:stä 250 kN:iin ja kokonaistonnimäärä pysyy samana. Akselia kohden kasvu on (tällöin myös kokonaistonnimäärä kasvaa) : $250/225 * 2,2 \% = 2,4 \%$.

8.4 Amerikkalaiset tutkimukset

8.4.1 Malmбанan

Ruotsin Banverket teetti myös vertailevan tutkimuksen kunnossapidon muutoksista, kun aikomuksena oli nostaa akselipainoa 250 kN:sta 300 kN:iin malmiradalla (Malmбанan). Tekijä oli ulkopuolinen amerikkalainen konsulttiyhtiö Zeta-Tech. Tutkimuksessa lähtökohtana oli kokonaistonnimäärän pysyminen vakiona, uudentyyppisiin malmivaunuihin siirtyminen ja nopeuden nostaminen 50 km:sta/h lukemaan 60 km/h.

Malmiradalla on myös vähäinen määrä muuta liikennettä, jonka arvioitiin pysyvän tässä tarkastelussa ennallaan. Tämä liikenne on mukana kustannuslaskelmissa omalla osuudellaan, joka on kokonaiskustannuksista 13,6 %. Rata on siis tyypiltään osittain sekaliikennenerata. Tämän tutkimuksen tulokset löytyvät taulukosta 8.12.

Taulukko 8.12 Akselipainon noston 250 kN:sta 300 kN:iin vaikutukset liikenteen aiheuttamiin vuotuisiin kunnossapitokustannuksiin Ruotsin malmiradalla (Malmabanen). /41/

Radanosa	Radanosan tarkennus tai vian tyyppi	Osuus radanosan kustannuksista (%)	Kust. ennen (M-SEK)	Kust. jälkeen (M-SEK)	Odotettu muutos kunnossap. kust. (%)
Kiskot (100%)	Sivukuluminen	10,1	2,68	2,29	-14,60
	Sisäinen väsyminen	10,0	2,66	3,68	38,33
	Pinnan väsyminen	54,9	14,61	15,60	6,80
	Pintavauriot	15,0	3,99	3,99	0,11
	Termitihitsivauriot	7,5	1,995	2,92	46,27
	Kiskon katkeaminen	2,5	0,665	0,67	0,11
Pölkyt (100%)	Puupölkyt	68,2	0,66	0,71	8,04
	Betonipölkyt	31,8	0,31	0,31	0,11
Tukikerros ja geometria (100%)	Hyvälaatuinen sepeli	78,6	1,06	1,06	0,11
	Huonolaatuinen sepeli	4,8	0,07	0,14	115,60
	Turve (alusmaa)	16,6	0,22	0,69	209,26
Vaihteet (100%)	Kokonaisuutena	100,0	6,00	7,48	24,61
Yhteensä			34,92	39,54	13,24 %

Kunnossapitokustannukset nousevat siis 13,24 %, kun akselipaino nousee 250 kN:sta 300 kN:iin. Kun halutaan tietää samojen tietojen perusteella, mikä vaikutus olisi akselipainon nousulla 225 kN:sta 250 kN:iin, suhteellisella laskutavalla saadaan seuraavanlainen luku: $(250/225-1)/(300/250-1) * 13,24 \% = 7,4 \%$. Tämä luku edustaa siis tilannetta kun kokonaistonnimäärä pysyy vakiona. Akselia kohden laskettuna kunnossapitokustannusten nousu on $250/225 * 7,4 \% = 8,2 \%$.

8.4.2 Borlänge – Göteborg

Zeta-Tech teki Ruotsin Banverketille myös toisen selvityksen, jossa tutkittiin miten akselipainon nosto 225 kN:sta 250 kN:iin rataosuudella Borlänge-Göteborg vaikuttaa radan vaurioitumiseen ja kunnossapitoon. Tämä kyseinen rataosuus oli ensimmäinen (malmiradan lisäksi), jolla ruvettiin ajamaan tavarajunilla 250 kN:n akseleilla, ja myös ensimmäinen askel suunnitelmasta päivittää jopa puoli rataverkkoa 250 kN:lle. Tutkitulla rataosuudella on teknisessä mielessä hyvin erilaisia olosuhteita. Kokonaisuuden osalta voidaan todeta, että tekninen puoli on hyvin paljon suomalaisen kaltainen. Radalta löytyy lk-raidetta 20 m pitkällä 43 kg/m-kiskolla, pk-raidetta 40 m

pitkällä 43 kg/m-kiskolla ja jk-raidetta sekä 50 että 60 kg/m-kiskolla. Pölkkytyyppejä ovat betonipölkkyt elastisilla kiinnikkeillä, puupölkkyt elastisilla kiinnikkeillä sekä puupölkkyt naulakiinnikkeillä. Alusrakennetta on sekä hyvää, huonoa että turvetta, jota pidetään kaikista huonoimpana. Tässä selvityksessä käytetyt nopeudet ovat tavarajunilla käytössä olevia tai niille suunniteltuja eli 40, 60, 80 ja 100 km/h. /39/

Selvityksen analyyttinen lähestymistapa on samanlainen kuin Malmaban-selvityksissä, kuitenkin niin, että erot raiteen tyypissä, käytetyissä nopeuksissa ja muissa niihin liittyvissä tekijöissä otetaan huomioon. Tässä tutkimuksessa käytetään eksponentiaalisia akselipainosta riippuvia vauriokertoimia, jotka on kehitetty erikseen kaikille radanosien vauriotyypeille. Vauriosuhde on kaavan (2) kaltainen: /39/

$$(2) \quad F = (P / P_0)^n$$

F on akselipainon vauriokerroin (per akseli)
P uusi (korotettu) akselipaino (250 kN)
P₀ alkuperäinen (käytössä oleva) akselipaino (225 kN)
n akselipainon vaurion eksponentti

Borlänge-Göteborg -selvityksen tulokset löytyvät taulukosta 8.13.

Taulukko 8.13 Akselipainon korotuksen 225 kN:sta 250 kN:iin vaikutus eri vauriolajien kasvunopeuteen Borlänge-Göteborg -radalla. /39/

Radanosa	Radanosan tarkennus tai vian tyyppi sekä osuus radanosan vioista (%)	Vaurion eksponentti n (odotettu)	Vauriokerroin 250 kN:lle F
Kiskot	Kuluminen	1	1,11
	Sisäinen väsyminen	3	1,37
	Pinnan väsyminen	1,8	1,21
	Pintavauriot	1	1,11
Termiittihitsit	Sisäinen väsyminen	3,33	1,42
	Kiskon katkeaminen	1	1,11
Pölkkyt	Puupölkky	1,5	1,17
	Betonipölkky	1	1,11
Tukikerros	Hyvälaatuinen sepeli/hyvä alusmaa	1	1,11
	Hyvälaatuinen sepeli/huono alusmaa	5,6	1,80
	Hyvälaatuinen sepeli/turve-alusmaa	7,8	2,27
Vaihteet	Kokonaisuutena	3	1,37

Taulukon 8.13 kertoimia käyttäen voidaan laskea taas yksi kunnossapitokustannusten kasvuprosentti käyttäen kunnossapitokustannusten jakaantumiselle taulukon 8.11 mukaista jakoa muokattuna tämän selvityksen tietojen perusteella. Oletuksena on taas se, että radalle aiheutuneet vauriot ja radan kunnossapitokustannukset kasvavat samassa suhteessa. Ensiksi on kuitenkin laskettava eri radanosille kerroin, jonka perustana ovat vaurioiden kasvukertoimet ja vaurioiden osuudet koko radanosan vaurioista.

Kiskot ja vaihteet :

- Kuluminen kerroin 1,11 ja osuus (30 %) antaa $1,11 * 0,3 = 0,333$
 - Sisäinen väsyminen kerroin 1,37 ja osuus (15 %) antaa $1,11 * 0,15 = 0,2055$
 - Pinnan väsyminen kerroin 1,21 ja osuus (30 %) antaa $1,21 * 0,3 = 0,363$
 - Pintaviat kerroin 1,11 ja osuus (10 %) antaa $1,11 * 0,1 = 0,111$
 - Hitsit, eristysjatkokset kerroin 1,42 ja osuus (15 %) antaa $1,42 * 0,15 = 0,213$
- Pelkän kiskon kerroin (yhteensä) = 1,2255

Tässä tapauksessa on lisäksi vaihteita käsitelty kiskojen osana ja se johtaa seuraavaan :

- Kiskot kerroin 1,2255 ja osuus 81,60 % antaa $1,2255 * 0,816 = 1,000$
 - Vaihteet kerroin 1,37 ja osuus 18,40 % antaa $1,37 * 0,184 = 0,252$
- Kiskot ja vaihteet sama kerroin(yhteensä) = 1,25

Pölkyt :

Suomessa on noin 4 miljoonaa betonipölkyä ja 11 miljoonaa puupölkyä joten kerroin on silloin

$$(4/15) * 1,11 + (11/15) * 1,17 = 1,15$$

Tukikerros :

- Hyvä alusmaa kerroin 1,11 ja osuus 78,59 % antaa $1,11 * 0,7859 = 0,872$
 - Huono alusmaa kerroin 1,80 osuus 4,82 % antaa $1,80 * 0,0482 = 0,087$
 - Turve alusmaan kerroin 2,27 ja osuus 16,59 % antaa $2,27 * 0,1659 = 0,377$
- Tukikerroksen kerroin(yhteensä) = 1,34

Laskelmien pohjalta saadut uudet kunnossapitokustannukset ovat taulukossa 8.14.

Taulukko 8.14 Akselipainon noston 225 kN:sta 250 kN:iin vaikutus kunnossapitokustannuksiin Borlänge-Göteborg -radan tietojen perusteella.

Radanosa	Osuus kunnossapitokustannuksista (%)	Kerroin	Uudet kunnossapitokustannukset (%)
Kiskot	30	1,25	37,5
Termiittihitsit	5	1,42	7,1
Eristysjatkokset	15	1,42	21,3
Pölkyt + Kiinnikkeet	4,4	1,15	5,1
Vaihteet	29,6	1,22	36,1
Tukikerros	10	1,34	13,4
Tarkastus	6	1,05	6,3
Yhteensä			126,8 %

Taulukon 8.14 mukaan kunnossapitokustannukset nousevat siis jopa 27 % akselia kohden, kun akselipainoa korotetaan 225 kN:sta 250 kN:iin. Kokonaistonnimäärän pysyessä muuttumattomana tämä nousu olisi vielä 24 %. Tämä arvo poikkeaa kolmesta

aiemmasta laskelmasta niin huomattavasti, että siihen olisi löydettävä selitys. Ensimmäiseksi on otettava huomioon, että kyseessä on yksi rata-osuus Borlänge-Göteborg kaikkine erilaisine radan päällysrakenteineen, jotka jo nekin kertovat radan olevan ainakin osittain melko vanha.

Kustannusten merkittävä kasvu ei sinänsä kuitenkaan ole yllättävää, koska jk-raiteen lisäksi on sekä lk-raidetta (kiskonpituus 20 m) että pk-raidetta (kiskonpituus 40 m). Tällöin korkeammille akselipainoille vaurioalttiita jatkoksia on huomattavasti enemmän, kuin jos koko rata olisi jk-raidetta, jossa eristysjatkoskohtien välimatka on yleensä useita kilometrejä. Muissa aiemmin käsitellyissä tutkimuksissa (ORE sekä Malmaban) radat olivat kokonaisuudessaan jk-raidetta, joten selvä ero tuleekin löytyä. Myös haastatteluissa tuli hyvin ilmi juuri jk-raiteen sopivuus korkeammille akselipainoille.

Kyseisessä radassa oli myös 43 kg/m -painoista kiskoa, jota voidaan pitää vanhanpuoleisena ja muutenkin sen käytöstä ollaan luopumassa. Tämä selittää osaltaan huomattavan lukuisat kiskovauriot. Tällä on osavaikutus myös jatkosten suureen vauriokertoimeen. Kun kiskonkiinnikkeinä oli vielä jopa vanhoja naulakiinnityksiä, korkeat vauriokertoimet tuntuvat melko luontevilta. Muut kiskot eli 50 ja 60 kg/m jatkuviksi hitsattuina eivät huonontane tulosta. 50 kg/m-kisko on kuitenkin painoltaan hieman pienempi kuin Suomessa käytetty 54 E 1-kisko. Tämä kisko onkin kevyin, jolla liikennöiminen 250 kN:n akselipainoilla voidaan sallia.

Kaikissa kotimaisten asiantuntijoiden haastatteluissa tuli ilmi se tosiasia, että Suomessa ei tulisi ajaa K43-kiskolla 250 kN:n akselipainolla ainakaan tavarajunien normaalia matkanopeutta (80 km/h). Korkeampi akselipaino sopii vain kiskopainoille 54 ja 60 kg/m. /23, 28, 30, 32, 33, 34, 38/

Borlänge-Göteborg radalla oli sekä betoni- että puupölkkyjä. Tilanne on aivan sama kuin kotimaisilla radoilla, joilla uutta korkeampaa akselipainoa harkitaan otettavaksi käyttöön. Koska ruotsalaisella radalla oli myös vanhoja naulakiinnikkeitä, ainakin osa puupölkkyistä on todennäköisesti vanhoja. Pölkkyjen kerroin ei kuitenkaan oleellisesti poikkeaa aiemmin saaduista arvoista. Sekin siis edelleen viittaisi siihen, että pölkky ei ole tämän tutkimuksen kriittinen tekijä.

Tukikerros kestää hyvin, jos alusrakenne on kunnossa, kuten aiemmin on todettu. Vaikka tämä tutkimus ei otakaan kantaa alusrakenteeseen, tässä tulee hyvin ilmi alusrakenteen merkitys myös tukikerroksen kunnossapitoon. Alusrakenteen vaikutukset heijastuvat koko radan rakenteeseen.

Vaihteiden vauriokerroin on huomattavan suuri Borlänge-Göteborg -radalla. Se on luonnollista, koska kiskojenkin kerroin on suuri. Koska radalla on vanhoja 43 kg/m-kiskoja, siellä on todennäköisesti myös vanhoja ko. kiskosta tehtyjä vaihteitakin. Tällaiset vanhat vaihteet eivät millään kestä liikennettä 250 kN:n akseleilla niin, että vauriot pysyisivät vielä hyväksyttävällä tasolla.

Yhteenvedona voidaan todeta Borlänge-Göteborg -radan olevan esimerkki siitä, että koko radan tulee olla mitoitettu 250 kN:n akselipainoille, jotta liikennöinti radalla olisi kannattavaa ja myös kunnossapidollisesti järkevää. Tämän radan vaurioarviot 250 kN:n

akselipainoilla poikkeavat muista saaduista tuloksista niin paljon, että tässä tutkimuksessa niitä ei käytetä muiden saatujen arvojen rinnalla. On katsottava ko. radan olevan rakenteeltaan vertailukelvoton raskaammalle liikenteelle suunniteltujen ratojen kanssa, joita kaikki muut vertailutulokset edustavat. Suomessa 250 kN:n akselipaino tullee käyttöön vain radoilla, jotka jo alunperin on suunniteltu korkeammille akselipainoille kuin ne radat, missä on vielä nykyisin K43-kiskoa. Borlänge-Göteborg-rata siis todistaa, että koko rata on mitoitettava korkeammille akselipainoille, jos niiden käyttöönottoa harkitaan.

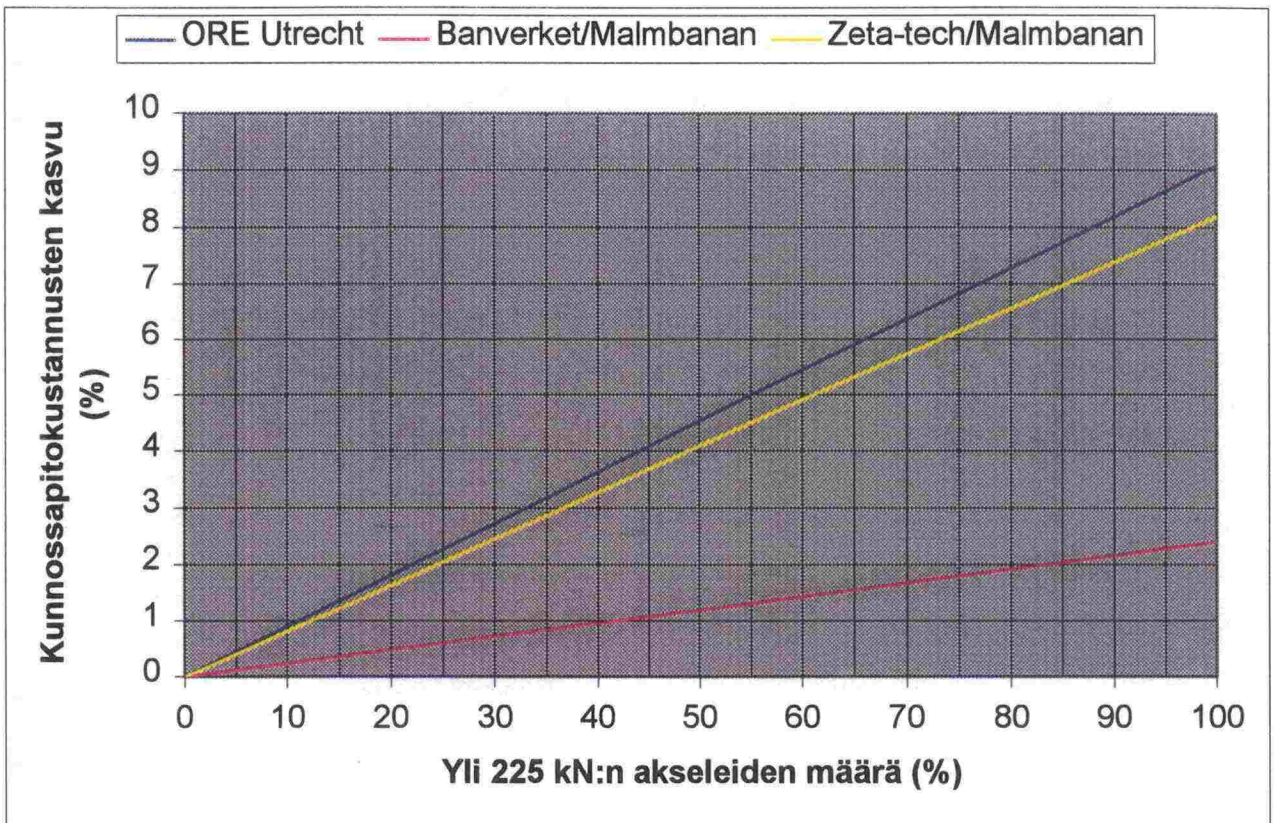
9. PÄÄTELMÄT

Paljonko kunnossapitokustannukset muuttuvat (nousevat), kun akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin? Kysymykseen on vaikea vastata yksiselitteisesti, koska silloin vastaus ei vastaisi todellista tilannetta. Helpoimmassa tapauksessa kaikkien akseleiden paino ennen korotusta olisi 225 kN ja korotuksen jälkeen 250 kN. Tällöin vastaus olisi suoraan luettavissa luvun 8 laskelmista. Nyt radoilla liikkuvien junavaunujen akselipainot kuitenkin vaihtelevat suuresti; on henkilö-, tavara-, malmivaunuja jne. Lisäksi vaunut on lastattu joko osittain tai täyteen, tai ne ovat jopa aivan tyhjiä. Jotta todellista tilannetta voitaisiin kuvata jotenkin, se voidaan simuloida luomalla jokin oletettu jako eri suuruisten akselipainojen kesken. Tällainen tutkielma löytyy taulukosta 9.1. Kunnossapitokustannusten lisääntymiselle on kertoimena käytetty ulkomaisista tutkimuksista johdettujen lukujen (3 kpl) keskiarvoa, joka tässä tapauksessa on $(9,1 + 2,4 + 8,2) \% / 3 = 6,57 \% \approx 7 \%$. Kunnossapitokustannusten nousua on pidetty suoraan verrannollisena niiden akseleiden määrään, joiden akselipaino nousee taulukon 8.3 johtopäätösten mukaisesti.

Taulukko 9.1 Radan päällysrakenteen kunnossapitokustannusten muutos erilaisilla akselipainoyhdistelmillä, kun suurin sallittu akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin. Tarkastelussa ovat akselimäärät.

Asetelma (Oletukset)	160 kN akseli- painon osuus (%)	200 kN akseli- painon osuus (%)	225 kN akseli- painon osuus (%)	250 kN akseli- painon osuus (%)	Kunnossa- pitokustan- nusten lisäys (%)
Lähtötilanne	20	30	50	0	0
Oletus 1	20	30	40	10	0,7
Oletus 2	20	30	30	20	1,4
Oletus 3	20	30	20	30	2,1
Oletus 4	20	30	10	40	2,8
Oletus 5	20	30	0	50	3,5

Kun vertaillaan kohtien 8.2, 8.3 ja 8.4 laskelmia, huomataan, miten kohdan 8.3 laskelma poikkeaa muista huomattavasti alaspäin, kun tulokset esitetään graafisessa muodossa (kuva 9.1). Tuloksissa on edelleen lähtökohtana taulukosta 8.3 tehty johtopäätös, jonka mukaan kunnossapitokustannusten kasvu on suoraan verrannollinen niiden akseleiden määrään, joiden akselipaino nousee. Tämän johdosta myös kustannusten nousu kuvassa 9.1 on suoraviivaista.



Kuva 9.1 225 kN:n ylittävien akselien määrän vaikutus radan päällysrakenteen kunnossapitokustannuksiin eri laskelmien perusteella.

Kuvan 9.1 tuloksia voidaan vertailla haastatteluissa saatuihin arvioihin, jolloin saadaan kokonaiskuva koko tutkimuksen tuloksista. Haastatteluiden lähtökohtana oli se, että kokonaistonnimäärä pysyy samana, kun akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin. Laskelmien ja haastatteluiden vertailu on taulukossa 9.2. Kaikki haastateltavat eivät antaneet numerollista arviota kustannusten muutokselle. Heidän sanalliset arvionsa ovat kuitenkin mukana tuloksissa, koska niistäkin ilmenee selvästi muutoksen suunta. Kaikilta haastateltavilta kysyttiin samat kysymykset. Nämä kysymykset löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 9.2 Radan päällysrakenteen kunnossapitokustannusten muutos erilaisilla akselipainoyhdistelmillä kun suurin sallittu akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin. Kokonaistonnimäärä pysyy muuttumattomana.

Tutkimus tai haastattelu	Kunnossapitokustannusten muutos/kasvu
ORE Utrecht	8,2 %
Banverket/Malmbanan	2,2 %
Zeta-Tech/Malmbanan	7,4 %
Haastattelu 1	5-10 %
Haastattelu 2	Lisääntynee
Haastattelu 3	10-15 %
Haastattelu 4	Nousevat hieman
Haastattelu 5	Lisääntyy
Haastattelu 6	10 %
Haastattelu 7	Nousevat lievästi

Jos kuvasta 9.1 ja taulukosta 9.2 tehdään yhteenveto, voidaan todeta, että radan päällysrakenteen kunnossapitokustannusten kasvu on 10 %:n luokkaa, kun akselipaino nousee 225 kN:sta 250 kN:iin. Sen tarkempaan lopputulokseen ei tämän tutkimuksen lähdeaineiston perusteella voine päätyä. Myös tutkimuksessa tehtyjen oletusten määrä rajoittaa lopputuloksen ilmoittamista suuremmalla tarkkuudella. Se, mitataanko kasvu samalla vai kasvaneella kokonaistonnimäärällä, merkitsee melko vähän. Erot ovat kuitenkin akselipainon pienestä kasvusta johtuen (n. 11 %) tämän tutkimuksen virhemarginaalin sisällä. Käytännössä akselikohtainen tieto lienee käyttökelpoisen, eli radan päällysrakenteen kunnossapitokustannukset nousevat enintään 10 % akselia kohden, kun akselipainoa korotetaan 225 kN:sta 250 kN:iin.

Kunnossapitokustannukset riippuvat myös raiteen kunnosta. Mitä paremmassa kunnossa raide on, sitä pienempiä ovat geometriavirheet. Tällöin myös kuluminen on pienempää, kuten myös kunnossapitokustannukset. Taulukon 8.2 tapaista erilaisten kuormitus-tilanteiden vertailua ORE käytti selvityksessä, jossa tutkittiin raiteen laadun vaikutusta radan kunnossapitokustannuksiin. Raiteen laatua arvioitiin radan geometrian perusteella, eli mitä pienempi kiskon liike on, sitä parempi on radan laatu. Arvokriteerinä oli raiteen liikkuminen paikaltaan, joko pysty- tai vaakasuunnassa tai molemmassa suunnassa. Vertailun tulokset ovat kuvassa 9.2. Kuvan suureiden käännökset:

Prosentual Anteil der Achsen = Akseleiden prosentuaalinen määrä

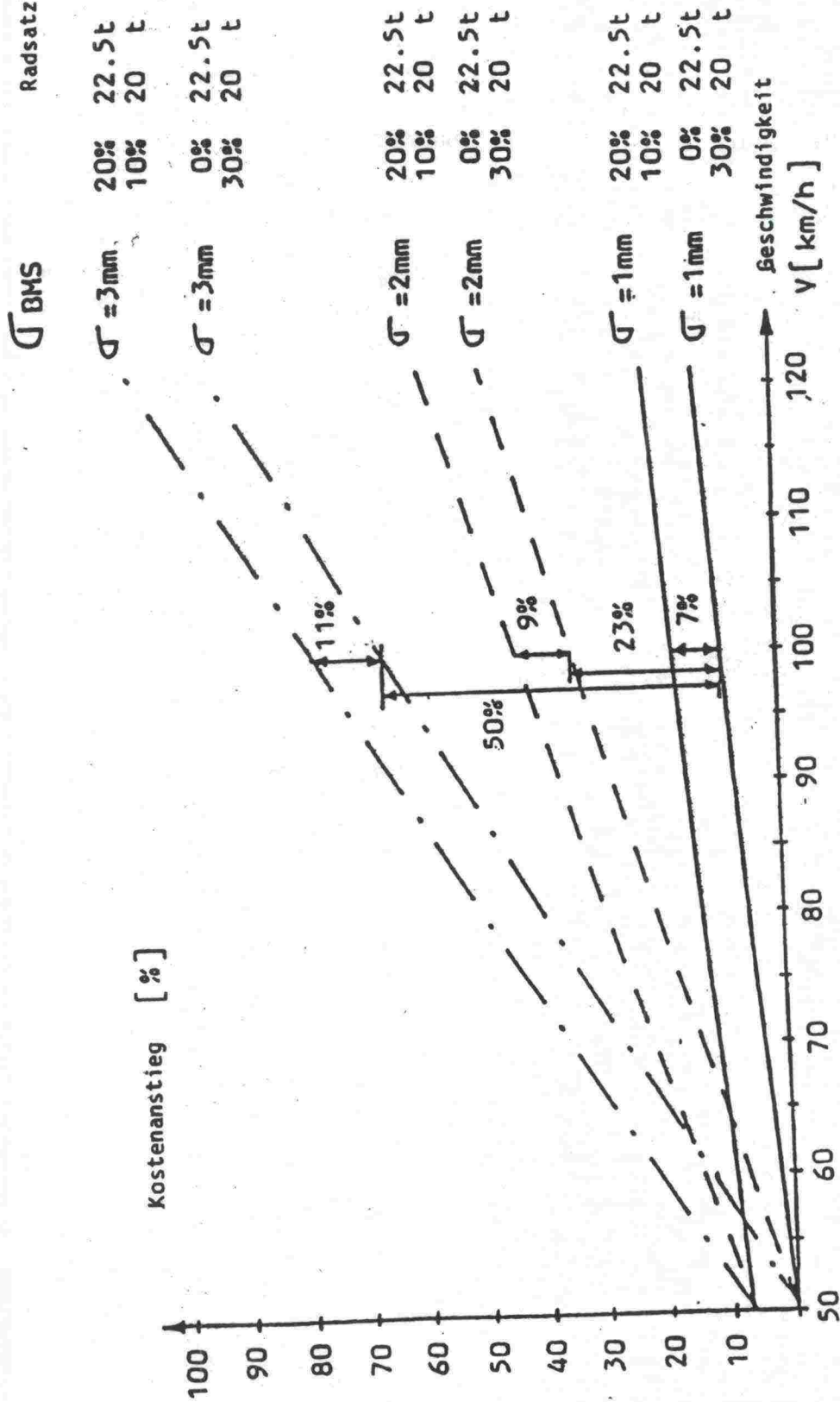
Radsatzlast = Akselipaino

Kostenanstieg = Kustannusten kasvu

Geschwindigkeit = Nopeus

σ_{BMS} = Raiteen liikkuminen paikaltaan

Kuvasta 9.2 esimerkiksi selviää, että kun raiteen liike (σ_{BMS}) kasvaa tietyssä kuormitus-tapauksessa 1 mm:sta 3 mm:iin, radan kunnossapitokustannukset nousevat jopa 50 %.



Kuva 9.2 Radan kunnossapitokustannusten riippuvuus raiteen liikkeistä pois paikaltaan, nopeudesta ja akselipainosta erilaisissa kuormitustilanteissa. /20/

Voitaisiinko kuvan 9.2 mukaiset riippuvuudet ottaa huomioon kunnossapitonormeissa? Nykyiset kunnossapitotasotahan määräytyvät pelkästään nopeuden perusteella (kohdat 7.2.1-7.2.8). Samoin myös esim. Ruotsissa junien nopeus on ainoa määräävä tekijä kunnossapitotarkastelussa. Raiteen liikkeellä ja kunnossapitokustannuksilla on kuitenkin selvä riippuvuus. Mikä olisi järkevä sallittu raiteen liikkuminen (mm) 250 kN:n akselipainolla, siihen ei tämän tutkimuksen aineiston perusteella pystytä antamaan suositusta. Jää siis selvittämättä, millä raiteen liikkumisen arvolla (mm) korjaukseen kannattaa ryhtyä.

Tutkimuksessa tuli ilmi käytettävissä olevan, käyttökelpoisen lähdemateriaalin vähäinen määrä. Hyödynnetty tieto oli poikkeuksetta ulkomaista. Sekin jouduttiin muokkaamaan oletuksia käyttäen hyödynnettävään muotoon. Käyttöön saatu kotimainen tieto oli niin ylimalkaista, ettei sitä varsinaisesti pystytty hyödyntämään laskelmissa. Kotimainen tieto toimi ainoastaan ulkomaisen materiaalin vertailuaineistona. Siten saatiin varmistetuksi, että esim. kustannusten jakaantuminen ja suuruusluokka ovat oikean suuntaiset.

Koska kotimainen tieto oli niinkin karkeajakoista kuin kuvista 8.1 ja 8.2 ilmenee, tulisi asialle tehdä jotain. Nykyisessä muodossaan tieto ei siis kelpaa kuin yleistarkasteluun. Tietoa eri radanosista (kiskot, pölkyt jne.) ei ollut saatavilla. Joillakin tietyillä rataverkon osilla tällaista tietoa olisi mahdollisesti ollut "kaivettavissa esiin", mutta ainakaan valmiina tilastona sitä ei ollut saatavilla. Koko rataverkon kattavaa tilastoa, muunlaista kuin kuvissa 8.1 ja 8.2, ei edes ollut olemassa.

Jos tilanne on niin huono kuin edellä on kerrottu, tällaista tietoa tulisi heti ryhtyä keräämään suunnitelmallisesti. Olisi luotava jonkinlainen järjestelmä, johon saatavissa oleva tieto sijoitettaisiin tulevaisuuden käyttöä varten. Kun sallittuja akselipainoja ollaan nyt nostamassa 250 kN:iin ja tulevaisuudessa ehkä 300 kN:iin, tiedosta olisi suurta hyötyä uusien akselipainojen vaikutuksia arvioitaessa. Olisi löydettävä ratkaisu siihen, kuka tätä tietoa keräisi, mihin muotoon ja minne se sijoitettaisiin.

LÄHDELUETTELO

1. Banverket. 30 TON på Malmbanan. Rapport 3.4, Infrastruktur, Geoteknisk inventering. Oktober 1996. 228 s.
2. Banverket. 30 TON på Malmbanan. Rapport 4.1, Underhåll, Ekonomisk Nulägesanalys. November 1996. 34 s.
3. Banverket. 30 TON på Malmbanan. Rapport 4.4, Underhåll, Spårmekanisk Analys. November 1996. 102 s.
4. Birmann, F. Die Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen im Bahnnetz der Braunkohlenindustrie. Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 10, 1958. 7 s.
5. Ekskursio Lahteen 21.8.2000. Aiheena Speno-hiontajunaan tutustuminen ja junahenkilökunnan haastattelu.
6. Engberg, P. & Eriksson, E. LCA av sliprar, En jämförande livscykelanalys av betong- och träsliper, CIT Ekologik 1998:2. 125 s.
7. Fastenrath, F. Die Eisenbahnschiene. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Deutschland 1977.
8. Hammarlund, S. & Paulsson, B. Projekt Malmbanan 30 ton, allmänt samt speciellt spårteknisk utredning. Seminaariesitelmä, Stockholm 18.-19.3. 1997. 24 s.
9. Harju, J. & Hartikainen, O-P. & Meriläinen, J. & Mustonen, J. & Ojanperä, K & Valtonen, J. Raidetutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A3/2001. 90 s.
10. Hay, W. Railroad Engineering. John Wiley & Sons. USA, 1982. 728 s, 12 liites.
11. Hecke, A. Effects of future mixed traffic on track deterioration, M.Sc.thesis, Järnvägsteknik, Institutionen för Farkostteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm 1998. 85s.
12. Iivonen, J. Heipakki kilahtaa sepeliin ratatyömaalla, artikkeli Helsingin Sanomissa 16.9.2000.
13. Konieczny, H. & Weiner, A. Järnvägen och dess underhåll. Examensarbete, Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg, 1995. 80 s, 21 liites.
14. Larsson, D. Modell för att prediktera nedbrytning av spåröverbryggnad. Seminaariesitelmä, Banverket, Borlänge, Ruotsi, 1.9.2000.
15. Lehtomäki, J. Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A3/2000. 57 s, 2 liites.
16. Magel E, Sroba P & Stanford J. Grinding Helps Handle Heavy-Haul Traffic. Railway Track & Structures. December 1999. 4 s.
17. Meriläinen, J. Betonisen ratapölkyn kapasiteetti ja voimasuureet. Teknillinen Korkeakoulu, Rakenteiden Mekaniikan Laboratorio. Lokakuu 2000.
18. Nordisk Studiegrupp. Hjul – Rälsslitage. Slutrapport. Augusti 1986. 151s, 9 liites.
19. Nurmikolu, A. Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 4/2000. 88 s, 33 liites.
20. ORE. Dynamische Erscheinungen der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis, aus der Sicht der Gleisunterhaltung. Utrecht, Frage D 161. September 1988. 56 s, 22 liites.

21. ORE. The dynamic effects due to increasing axle loads from 20 to 22.5 t and the estimated increase in track maintenance costs. Utrecht, Report D 161.1/RP 4. September 1987. 52 s, 19 liites.
22. Oy VR-Rata Ab, suunnitteluosasto. Raideseppelin laatuvaatimukset 1995. Helsinki 1995. 30 s.
23. Pennanen, J. Ratatoimintayksikön vastaava rakennusmestari, Kuopio/Oy VR-Rata Ab, puhelinhaastattelu 13.9.2000.
24. Ratahallintokeskus. Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 13, Radan tarkastus. Helsinki, 1997. 26 s.
25. Ratahallintokeskus. Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 2, Radan geometria. Helsinki, 2000. 72 s, 7 liites.
26. Ratahallintokeskus. Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne. Helsinki, 2000. 94 s, 46 liites.
27. Ratahallintokeskus. Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 4, vaihteet. Helsinki, 2000. 65 s, 12 liites.
28. Rautanen, P. Tuotepäällikkö/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 29.9.2000.
29. Repo, H. Ratajässikkä vaihtaa kiskot lennosta, artikkeli Tekniikka&Talous -lehdessä 28.9.2000.
30. Röman, R. Rata-alueen päällikkö, Tampere/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 25.8.2000.
31. Suomen virallinen tilasto. Ratatilasto 1988.
32. Takala, J. Hitsausmestari, Seinäjoen Rata-alue/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 5.9.2000.
33. Tiukkanen, H. Rata-alueen päällikkö, Kouvola/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 12.9.2000.
34. Torri, E. Kunnossapitopäällikkö/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 22.8.2000.
35. Torri, E. Kunnossapitopäällikkö/Oy VR-Rata Ab, haastattelu 29.11.2000.
36. Trevizo, M. FAST heavy axle load ballast test results. Association of American Railroads (AAR), Transportation Technology Center, report No R-914. Pueblo, 1997. 35 s.
37. Trevizo, M. Heavy Axle Load Ballast Experiment. 1st Annual AAR Research Review. Volume 1: FAST/HAL Test Summaries. November 6-9, 1995. 47 s.
38. Tuovinen, Y. Ylitarkastaja/RHK, haastattelu 1.8.2000.
39. Zeta-Tech. 25 TON på sträckan Borlänge/Göteborg. Rapport 1.2, Damage relationships For Increasing Axle Loads: 22,5 Tonnes to 25 Tonnes, 22,5 Tonnes to 30 Tonnes. Augusti 1999. 22 s, 16 liites
40. Zeta-Tech. 25 TON på sträckan Borlänge/Göteborg. Rapport 1.3, "Start up" issues for the proposed heavy axle load freight route Borlänge to Göteborg. Februari 1999. 35 s, 30 liites.
41. Zeta-Tech. 30 TON på Malmbanan/Ofofbanan. Rapport 5.1, Quantification of Track Maintenance Costs. September 1996. 60 s, 3 liites.

HAASTATTELUKYSYMYKSIÄ

**Lähtökohtana akselipainon nostolle tässä tutkimuksessa on se, että sama tonnimäärä kuljetetaan pienemmällä akselimäärällä.
Uusi korotettu akselipaino on 250 kN.**

TUKIKERROS

- Muuttaako akselipainon nosto tukikerroksen (raidesepelin) hienonemista?
- Muuttuuko tukikerroksen tiivistyminen, ja muuttuuko samassa suhteessa?
- Aiheuttaako akselipainon nosto muutoksia painumien syntyyn tukikerroksessa?
- Muuttuuko mielestäsi sepelin vaihtotarve akselipainon noston yhteydessä?
- Jos muuttuu, niin millä tavalla mielestäsi?
- Miten tukikerroksen kunnossapitotarve mielestäsi muuttuu?

PÖLKYT JA KIINNITTIMET

- Kestävätkö betonipölkkyt akselipainon noston rikkoutumatta?
- Pysyvätkö kiinnittimet betonipölkkyissä korkeammilla akselipainoilla?
- Kestävätkö puupölkkyt akselipainon noston rikkoutumatta?
- Pysyvätkö kiskon kiinnittimet yhtä hyvin kiinni kuin ennen akselipainon nostoa?
- Jos eivät, niin millä kiinniketyypeillä ongelmia ilmenee, ja jos, niin minkälaisia?
- Onko kaarten säteellä merkitystä kiinnittimien pysymiselle akselipainoa nostettaessa?
- Miten akselipainon nosto muuttaa pölkkyjen ja kiinnittimien kunnossapitotarvetta?

VAIhteet

- Akselipainon noston vaikutus vaihteiden kulumisnopeuteen?
- Muuttuvatko vaihteisiin tulevat vauriot akselipainon noston myötä?
- Jos muuttuvat, niin millä tavalla?
- Miten mielestäsi akselipainon nosto vaikuttaa vaihteiden kunnossapitokustannuksiin?

KISKOT JA LIITOKSET

- Muuttuuko kiskojen rekkautuminen akselipainon noston myötä?
- Muuttuuko kiskojen kulumisen akselipainon noston myötä?
- Aiheuttaako suurempi akselipaino erityyppisiä vaurioita nykyisiin verrattuna?
- Minkälaiset kiskovauriot ovat tyypillisiä suuremmille akselipainoille?
- Ovatko jotkin kiskojen pintavauriot tyypillisiä suurille akselipainoille?
- Onko kiskoluokalla (60/54(/43)) merkitystä kulumisen kannalta suuremmilla painoilla?
- Jos on, niin miten se ilmenee, eli mahdollisesti missä keskinäisessä suhteessa?
- Muuttuuko kulumisen jollakin tietyllä kiskotyypillä(lk, pk, jk) akselipainoa nostettaessa?
- Jos , niin miten se ilmenee?
- Vaikuttaako akselipainon nosto kiskoliitoksiin, jos niin miten?
- Akselipainon noston vaikutus kiskohitsien kestävyys?
- Minkä hitsityyppien kestävyys akselipainon nosto aiheuttaa muutoksia?
- Muuttuuko kiskojen hiontarve akselipainoa nostettaessa?
- Jos muuttuu, niin miten tuo tarve ilmenee?
- Miten mielestäsi akselipainon nosto vaikuttaa kiskojen kunnossapitokustannuksiin?

YLEISTÄ

- Miten kykenee erottamaan suurten liikennemäärien aiheuttamat vauriot ja kulumat suurista akselipainoista johtuvista vastaavista?
- Mitkä nämä erot em. eri osa-alueilla mielestäsi ovat?
- Miten tärinä ja sen vaikutus rataan muuttuu akselipainoa nostettaessa?
- Pystyykö muutoksen arvioimaan, kun liikkuvan junan rataan aiheuttama voima on lajiltaan dynaamista?
- Mitkä ovat mielestäsi tärkeimmät huomioonotettavat asiat kunnossapitönäkökohdasta akselipainoja nostettaessa?
- Onko sinulla näkemystä nousevatko vai laskevatko kunnossapitokustannukset, kun sama tonnimäärä kuljetetaan pienemmällä määrällä akseleita?
- Mitkä ovat syyt joiden perusteella tähän johtopäätökseen päädyt?
- Millä radan osilla on mielestäsi suurin vaikutus kunnossapitokustannusten muutoksiin akselipainoa nostettaessa?

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
 2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
 3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
 4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
 5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
 1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutus selvitys
 2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
 3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
 4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
 5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
 6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankkeissa
 1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset
 3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama värinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
 6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-Haaparanta akselipainojen korottamista varten
 8/1999 Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämismahdollisuuksien vaikutustarkastelut
 2/2000 Bantrum, 250 kN och 300 kN axellaster
 3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
 4/2000 Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään
 5/2000 Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 6/2000 Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen ratateknisistä tutkimuksista
 7/2000 Intermediate Report, 250 kN and 300 kN axle loads
 8/2000 Ratatekniset määräykset ja ohjeet -julkaisun käytettävyydestä tutkimus
 9/2000 Ratakapasiteetin perusteet
 10/2000 Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 axle loads
 11/2000 Rautatieonnettomuuksien sisäiset ja ulkoiset kustannukset
 12/2000 Internal and External Costs of Railway Accidents
 1/2001 Rataverkko 2020 -suunnitelma
 2/2001 XPS-routaeristelevyt ratarakenteissa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 3/2001 Raidetutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot

RATAHALLINTOKESKUS
 KAIVOKATU 6, PL 185
 00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Kari Ojanperä, puh. (09) 5840 5183, sähköposti: kari.ojanpera@rhk.fi
 Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-050-x
 ISSN 1455-2604